



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**DETEKSI KERUSAKAN BATANG ROTOR PADA
MOTOR INDUKSI SANGKAR BAJING MENGGUNAKAN
METODE STANDAR DEVIASI BERBASIS ANALISIS
*EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION***

Nabila Ardhana Iswari Azisputri
NRP 2212100096

Dosen Pembimbing
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TE 141599

**BROKEN ROTOR BAR DETECTION
IN INDUCTION MOTOR SQUIRREL CAGE
USING STANDARD DEVIATION METHOD BASED ON
EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION ANALYSIS**

Nabila Ardhana Iswari Azisputri
NRP 2212100096

Advisor
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

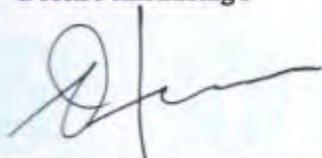
**DETEKSI KERUSAKAN BATANG ROTOR PADA
MOTOR INDUKSI SANGKAR BAJING MENGGUNAKAN
METODE STANDAR DEVIASI BERBASIS ANALISIS
EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
- Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I



Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 19810905 200501 1 002

Dosen Pembimbing II



Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

NIP. 19551207 198003 1 004



DETEKSI KERUSAKAN BATANG ROTOR PADA MOTOR INDUKSI SANGKAR BAJING MENGGUNAKAN METODE STANDAR DEVIASI BERBASIS ANALISIS *EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION*

Nabila Ardhana Iswari Azisputri
2212100096

Dosen Pembimbing 1 : Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
Dosen Pembimbing 2 : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

ABSTRAK

Kerusakan batang rotor mencapai 5% - 10% dari seluruh kasus gangguan motor induksi. Oleh karena itu, perlu adanya diagnosa awal yang mendeteksi adanya gangguan pada rotor motor induksi sangkar bajing, agar langkah perbaikan lebih cepat dan tanggap sebelum terjadi gangguan yang lebih besar.

Hingga saat ini sudah banyak metode untuk mendeteksi kerusakan batang rotor motor induksi yaitu melalui MCSA (*Motor Current Signature Analysis*). Dalam Tugas Akhir ini akan dikembangkan teori MCSA dengan Analisis EMD (*Empirical Mode Decomposition*) yang akan menguraikan sinyal arus stator motor ke dalam bentuk IMF (*Intrinsic Mode Function*). Metode ini berbasis penguraian statistika dengan keluaran berupa standar deviasi dari arus stator. Arus stator terdekomposisi ditelusuri letak dan periode *zero crossing*-nya untuk diperhitungkan nilai standar deviasinya. Metode ini dapat menunjukkan perbedaan standar deviasi arus antar jumlah batang rotor yang rusak sehingga mampu mendeteksi adanya kerusakan secara lebih akurat.

Hasil yang didapatkan dari tugas akhir ini berupa grafik persebaran nilai standar deviasi dan kurva PDF (*Probability Density Function*) dalam distribusi normal. Pada motor normal, nilai standar deviasi yang didapatkan menyebar secara luas. Sedangkan pada motor dengan *broken rotor bar*, persebaran standar deviasi cenderung stagnan. Hal ini dipengaruhi oleh adanya harmonisa yang bersifat secara periodik akibat adanya kecacatan pada *rotor bar*.

Kata Kunci: Motor Induksi, *Electrical Mode Decomposition*, *Intrinsic Mode Function*, Standar Deviasi.

BROKEN ROTOR BAR DETECTION IN INDUCTION MOTOR SQUIRREL CAGE ROTOR USING STANDARD DEVIATION METHOD BASED ON EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION ANALYSIS

Nabila Ardhana Iswari Azisputri
2212100096

1st Advisor : Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D
2nd Advisor : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

ABSTRACT

Broken rotor bar reaches 5% - 10% of all cases of induction motor faults. Therefore, we need early diagnosis that detects disturbance in the rotor squirrel cage induction motor, so that corrective actions can be taken faster and responsive before the greater disorder.

Until now many methods are done for detecting damage to the induction motor rotor bar, through MCSA (Motor Current Signature Analysis). In this final project will be developed from MCSA theory with EMD (Empirical Mode Decomposition) analysis, which will decompose the current signal of motor stator into the IMF (Intrinsic Mode Function) form. This method is based on statistical decomposition with the output of a standard deviation of stator current. The decomposed stator current is traced and its zero crossing period is processed into standard deviation values. This method can show the standard deviation of the difference between the normal rotor bar and damaged rotor bar so can detect any damage more accurately.

Results that are obtained from this final assignment are in the form of standard deviation scatter graphs and PDF (Probability Density Function) curves in a normal distribution. On a normal motor, the obtained standard deviation values are widely spread. While on the motor with broken rotor bars, standard deviation of the distribution tends to stagnate. This is influenced by the presence of harmonics that are happened periodically due to defects in the rotor bars.

Key Words : Induction motor, Electrical Mode Decomposition, Intrinsic Mode Function, Standard deviation.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat, taufik, dan hidayah-Nya, sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Melalui kegiatan ini, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang bersifat penelitian ilmiah selama satu semester sebagai pengaplikasian ilmu yang telah didapat selama tujuh semester.

Buku tugas akhir ini dapat terselesaikan atas bantuan banyak pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Papaku Ir. Zainudin Azis, mamaku Sri Ratna Novianingsih dan adikku, Pradnya Paramitha Azzahra Azisputri, dan seluruh keluarga besar yang telah banyak memberikan dorongan, baik dalam hal spiritual maupun material dalam penyelesaian buku tugas akhir ini.
2. Bapak Dimas Anton Asfani dan Bapak Soedibyo selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan masukan serta arahan sehingga buku tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.
3. Bani sebagai partner seperjuangan tugas akhir ini.
4. Seluruh asisten Laboratorium Konversi Energi, anggota State Official, Adhi, teman-teman e52, Brotherhood, CCD, dan WM yang selalu memberikan semangat dan doa serta bantuan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
5. Asisten Laboratorium Simulasi dan Tegangan Tinggi, Mas Alfian, Mas Mei, Mas Dimok, Mas Azwar, Mas Feri, Mas Dapis, Luthfi, Rizky, dan Khairurizal yang turut membantu pelaksanaan tugas akhir ini.
6. Bapak Naryono dan Bapak Faisal yang telah memberikan saran dan bantuan dalam pelaksanaan tugas akhir ini.

Besar harapan penulis bahwa buku tugas akhir ini dapat memberikan informasi dan manfaat bagi mahasiswa Teknik Elektro ITS pada khususnya dan seluruh pembaca pada umumnya.

Surabaya, 22 Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Metodologi	2
1.4.1 Tahap Perancangan Sistem	2
1.4.2 Tahap Pengujian Sistem	3
1.4.3 Tahap Analisis	3
1.5 Sistematika Penulisan	3
1.6 Relevansi atau Manfaat	4
BAB 2 DASAR TEORI	5
2.1 Batang Rotor Sangkar Baging Motor Induksi	5
2.2 Kerusakan Batang Rotor pada Motor Induksi Sangkar Baging	9
2.3 <i>Motor Current Signature Analysis</i> (MCSA)	12
2.4 <i>Empirical Mode Decomposition</i> (EMD)	13
2.5 Standar Deviasi	14
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM DETEKSI	17
3.1 Konfigurasi Sistem	17
3.2 Pengkondisian Kerusakan Batang Rotor Motor Induksi	22
3.3 Pembebanan Elektris	23
3.4 Listing EMD	24
BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA	27
4.1 Pencuplikan Sinyal Arus Stator Menggunakan cDAQ 9171 dan <i>Software</i> LabVIEW serta DIAdem	28

4.2	Pengolahan Sinyal Arus Stator ke dalam Bentuk <i>Intrinsic Mode Function</i> (IMF) Menggunakan Metode <i>Empirical Mode Decomposition</i> (EMD)	29
4.3	Pengujian Sistem Deteksi dengan Standar Deviasi dan Kurva Distribusi Normal	40
4.3.1	Sistem Deteksi <i>Broken Rotor Bar</i> pada Motor Berbeban 100 Watt (Tanpa Dikopel dengan Generator)	40
4.3.2	Sistem Deteksi <i>Broken Rotor Bar</i> pada Motor Berbeban 900 Watt (Telah Dikopel dengan Generator)	43
4.3.3	Sistem Deteksi <i>Broken Rotor Bar</i> pada Motor Berbeban 1.100 Watt atau 300 Watt Bohlam	46
4.3.4	Sistem Deteksi <i>Broken Rotor Bar</i> pada Motor Berbeban 1.300 Watt atau 600 Watt Bohlam	49
4.3.5	Sistem Deteksi <i>Broken Rotor Bar</i> pada Motor Berbeban 1.500 Watt atau 900 Watt Bohlam	52
4.4	Pengaruh Pembebanan pada Arus Stator Motor Induksi	53
BAB 5 PENUTUP		57
5.1	Kesimpulan	57
5.2	Saran	57
DAFTAR PUSTAKA		61
LAMPIRAN		63
RIWAYAT HIDUP		69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Motor induksi tiga fasa [3].....	5
Gambar 2.2.	Konstruksi motor sangkar induksi [4]	6
Gambar 2.3.	Karakteristik torsi vs kecepatan pada berbagai kelas motor induksi [5].....	7
Gambar 2.4.	Desain kelas rotor motor induksi sangkar bajing[5]	8
Gambar 2.5.	Kerusakan batang rotor karena rusaknya laminasi rotor akibat tingkat pemanasan yang parah [7].....	10
Gambar 2.6.	Contoh kurva lonceng pada distribusi normal untuk menggambarkan standar deviasi [9]	15
Gambar 3.1	Gambaran sistem dalam Tugas Akhir.....	17
Gambar 3.2.	Peralatan yang dibutuhkan	20
Gambar 3.3.	Bentuk sinyal arus asli pada (a) <i>software</i> LabVIEW (b) DIAdem	21
Gambar 3.4.	Bentuk pengkondisian kerusakan rotor bar	22
Gambar 3.5.	Skema pembebanan elektris pada Tugas Akhir	23
Gambar 3.6.	Diagram alir EMD.....	26
Gambar 4.1.	Dekomposisi EMD ke dalam bentuk IMF pada motor kondisi normal.....	30
Gambar 4.2.	Dekomposisi EMD ke dalam bentuk IMF pada motor dengan 1 <i>Broken Rotor Bar</i> (BRB) sedalam 3mm.....	31
Gambar 4.3.	Dekomposisi EMD ke dalam bentuk IMF pada motor dengan 1 <i>Broken Rotor Bar</i> (BRB) sedalam 7mm.....	32
Gambar 4.4.	Dekomposisi EMD ke dalam bentuk IMF pada motor dengan 3 <i>Broken Rotor Bar</i> (BRB) sedalam 3mm.....	33
Gambar 4.5.	Dekomposisi EMD ke dalam bentuk IMF pada motor dengan 3 <i>Broken Rotor Bar</i> (BRB) sedalam 7mm.....	34
Gambar 4.6.	Dekomposisi EMD ke dalam bentuk IMF pada motor dalam kondisi normal.....	35
Gambar 4.7.	Dekomposisi EMD ke dalam bentuk IMF pada motor dengan 1 <i>Broken Rotor Bar</i> (BRB) sedalam 3mm.....	36
Gambar 4.8.	Dekomposisi EMD ke dalam bentuk IMF pada motor dengan 1 <i>Broken Rotor Bar</i> (BRB) sedalam 7mm.....	37
Gambar 4.9.	Dekomposisi EMD ke dalam bentuk IMF pada motor dengan 3 <i>Broken Rotor Bar</i> (BRB) sedalam 3mm.....	38
Gambar 4.10.	Dekomposisi EMD ke dalam bentuk IMF pada motor dengan 3 <i>Broken Rotor Bar</i> (BRB) sedalam 7mm.....	39

Gambar 4.11.	Persebaran nilai standar deviasi dari motor tanpa beban dan tanpa dikopel dengan generator.....	41
Gambar 4.12.	Kurva distribusi normal dari motor tanpa beban, tanpa dikopel dengan generator	42
Gambar 4.13.	Persebaran nilai standar deviasi dari motor tanpa beban dan telah dikopel dengan generator.....	44
Gambar 4.14.	Kurva distribusi normal dari motor tanpa beban dan telah dikopel dengan generator	45
Gambar 4.15.	Persebaran nilai standar deviasi dari motor yang dibebani total 1.100 Watt	47
Gambar 4.16.	Kurva distribusi normal dari motor berbeban 1.100 Watt atau dengan 300 Watt bohlam	48
Gambar 4.17.	Persebaran nilai standar deviasi dari motor yang dibebani total 1.300 Watt	50
Gambar 4.18.	Kurva distribusi normal dari motor berbeban 1.300 Watt atau dengan 600 Watt bohlam	51
Gambar 4.19.	Persebaran nilai standar deviasi dari motor yang dibebani penuh 1.500 Watt.....	53
Gambar 4.20.	Kurva distribusi normal dari motor berbeban 1.500 Watt atau dengan 900 Watt bohlam	54
Gambar 4.21.	Berbagai bentuk sinyal arus stator fasa R yang dipengaruhi oleh variasi pembebanan dan kerusakan rotor bar yang ditampilkan dalam <i>software</i> DIAdem...56	

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1.	Data motor induksi 3 phasa	18
Tabel 3.2.	Data DAQ [10] [11]	19
Tabel 3.3.	Data generator sinkron	19
Tabel 4.1.	Perbandingan daya input motor dengan daya beban berupa bohlam.....	28
Tabel 4.2.	Nilai amplitudo tertinggi arus rata-rata setiap kasus	28
Tabel 4.3.	Nilai kepadatan rata-rata standar deviasi pada permodelan PDF pada motor berbeban total 100 Watt atau tanpa dikopel dengan generator.....	43
Tabel 4.4.	Nilai kepadatan rata-rata standar deviasi pada permodelan PDF pada motor berbeban total 900 Watt yang telah dikopel dengan generator.....	46
Tabel 4.5.	Nilai kepadatan rata-rata standar deviasi pada permodelan PDF pada motor berbeban total 1.100 Watt atau dengan 300 Watt bohlam	49
Tabel 4.6.	Nilai kepadatan rata-rata standar deviasi pada permodelan PDF pada motor berbeban total 1.300 Watt atau dengan 600 Watt bohlam	52
Tabel 4.7.	Nilai kepadatan rata-rata standar deviasi pada permodelan PDF pada motor berbeban total 1.500 Watt atau dengan 900 Watt bohlam	53
Tabel 4.8.	Nilai kepadatan rata-rata standar deviasi dalam kurva distribusi normal dengan variasi pembebanan	57

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Motor induksi merupakan peralatan elektromekanis yang paling banyak digunakan di industri. Hal ini disebabkan oleh keandalan motor induksi yang cukup tinggi dibandingkan dengan peralatan lainnya. Sedangkan di satu sisi, motor induksi memiliki struktur yang sederhana dengan biaya pengadaan dan perawatan yang rendah dibandingkan mesin lainnya. Motor induksi mampu menyediakan sekitar 85% dari daya yang dikonsumsi dalam industri. Namun hal ini tidak menjamin motor induksi tidak dapat mengalami kerusakan selama masa operasinya. Kerusakan motor induksi tentu merupakan kendala besar dalam suatu proses di industri dan dapat menyebabkan kerugian finansial, waktu, dan tenaga. Beberapa gangguan yang sering merusak motor induksi rotor sangkar bajing antara lain, kerusakan *bearing*, gangguan pada *air gap*, dan patah atau terkikisnya batang rotor.

Kerusakan batang rotor sendiri mencapai 5% - 10% dari seluruh kasus gangguan motor induksi [1]. Beberapa hal yang dapat menyebabkan kerusakan batang rotor motor induksi antara lain : adanya tingkat pemanasan yang sangat parah, adanya gesekan dan benturan saat proses perawatan motor, proses manufaktur motor yang kurang sempurna, dan lain sebagainya. Gangguan ini tentunya akan merugikan industri. Oleh karena itu, perlu adanya diagnosa awal yang mendeteksi adanya gangguan pada rotor motor induksi sangkar bajing, agar langkah perbaikan lebih cepat dan tanggap sebelum terjadi gangguan yang lebih besar.

Sistem pendeteksi kerusakan batang rotor motor induksi telah banyak dilakukan dengan berbagai macam cara, antara lain: tingkat vibrasi motor, temperatur mesin, adanya arus urutan nol, serta perubahan daya dan faktor daya secara cepat. Namun metode – metode tersebut membutuhkan biaya yang sangat besar. Saat ini telah dikembangkan metode baru yang digunakan untuk mendeteksi kerusakan batang rotor secara dini. Salah satunya melalui metode analisis bentuk gelombang arus motor induksi atau biasa dikenal dengan MCSA (*Motor Current Signature Analysis*) [2].

Dalam Tugas Akhir ini akan dikembangkan metode MCSA dengan Analisis EMD (*Empirical Mode Decomposition*) yang akan menguraikan

sinyal arus stator ke dalam bentuk IMF (*Intrinsic Mode Function*). Metode ini berbasis penguraian statistika dengan keluaran berupa standar deviasi dari arus motor. Metode ini dapat menunjukkan perbedaan standar deviasi arus antar jumlah batang rotor yang rusak sehingga mampu mendeteksi adanya kerusakan secara lebih akurat.

1.2. Permasalahan

Adapun fokus permasalahan yang terdapat pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Penggunaan metode MCSA sebagai metode pendeteksi kerusakan pada motor induksi masih kurang optimal saat ini. Perlunya peningkatan akurasi dari deteksi kerusakan rotor sangkar bajing motor induksi agar langkah perbaikan semakin cepat dan tanggap sebelum terjadi gangguan yang lebih besar.
2. Perlunya variasi pembebanan untuk masing – masing kondisi motor induksi agar metode pendeteksian dapat diaplikasikan untuk seluruh keadaan.
3. Pendeteksian kerusakan batang rotor dengan menggunakan EMD untuk mendapatkan bentuk IMF arus stator motor dan berikutnya diolah menjadi standar deviasi sebagai pengklasifikasi kondisi motor.

1.3. Tujuan

Tugas akhir ini bertujuan untuk mengklasifikasikan atau dapat membedakan motor induksi rotor sangkar bajing dalam kondisi sehat dengan kondisi motor dengan kerusakan batang rotor. Selain itu tugas akhir ini juga bertujuan untuk mendapatkan standar deviasi dari masing – masing kondisi arus stator, dalam kondisi tunak (*steady state*).

1.4. Metodologi

Metode yang digunakan pada penelitian ini terbagi menjadi tiga tahap, yaitu tahap perancangan sistem, tahap pengujian sistem dan tahap analisis, adapun keterangan mengenai masing-masing tahapan yang dilakukan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1.4.1. Tahap Perancangan Sistem

Tahap perancangan sistem dilakukan dengan melibatkan beberapa eksperimen pada motor induksi yaitu konfigurasi peralatan, rekonstruksi kerusakan pada batang rotor motor induksi, serta pemberian beban

mekanis secara bervariasi. Adapun langkah-langkah pada tahap pengambilan data antara lain:

1. Rekonstruksi Kerusakan Batang Rotor serta Pemberian Beban Mekanik dan Elektris Bervariasi, dilakukan dengan pengkondisian motor induksi pada kondisi yang sesungguhnya. Proses ini dilakukan untuk mendapatkan kondisi sinyal arus yang bervariasi sehingga dapat dirancang sebuah sistem yang mempertimbangkan banyak aspek.
2. Perancangan Listing Pengolahan Sinyal, dilakukan untuk mendapatkan sistem pengolahan sinyal yang sesuai dengan sistem yang dirancang. Listing pengolahan sinyal terdiri dari beberapa tingkat yang dibuat dengan menggunakan sebuah *software* terprogram. Listing pengolahan sinyal berbasis *Empirical Mode Decomposition* yang bersifat penguraian statistika untuk didapatkan klasifikasi antar kondisi motor.

1.4.2. Tahap Pengujian Sistem

Dalam tahap ini sistem yang telah dirancang sebelumnya, khususnya listing program pengolahan sinyal arus motor, akan mengalami proses pengujian. Proses pengujian yang dilakukan akan melibatkan beberapa parameter yang mendukung kinerja sistem sehingga dapat memudahkan proses selanjutnya.

1.4.3. Tahap Analisis

Tahap analisis dilakukan untuk mengidentifikasi kondisi hasil perancangan dan pengujian yang telah dilakukan. Tahap analisis dilakukan pada tiap kondisi pengukuran sinyal, kondisi kerusakan, pembebanan bervariasi, serta juga akan memperbandingkan keunggulan sistem yang telah dirancang dengan sistem lain yang sudah ada.

1.5. Sistematika Penulisan

Laporan penelitian ini dibagi menjadi lima bab. Adapun susunan laporan ini adalah sebagai berikut:

BAB 1. Pendahuluan

Bab ini berisi tentang latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan serta relevansi atau manfaat laporan tugas akhir.

BAB 2. Dasar Teori

Bab ini berisi teori-teori penunjang yang berhubungan dengan permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini.

Teori ini digunakan sebagai dasar dalam penulisan tugas akhir.

BAB 3. Perancangan Sistem Deteksi Kerusakan Batang Rotor Motor Induksi Menggunakan Metode Standar Deviasi Berbasis *Empirical Mode Decomposition*

Bab ini berisi tentang rancangan bagaimana sistem pendeteksian dan klasifikasi kondisi motor induksi dibuat.

BAB 4. Pengujian Sistem Deteksi Kerusakan Batang Rotor Motor Induksi Menggunakan Metode Standar Deviasi Berbasis *Empirical Mode Decomposition* dan Analisis Data

Bab ini berisi tentang pengujian dari sistem yang telah dirancang beserta analisisnya.

BAB 5. Penutup

Bab ini berisi tentang penutup yang memuat tentang kesimpulan yang dapat diambil dari hasil eksperimen dan pengujian yang telah dilakukan.

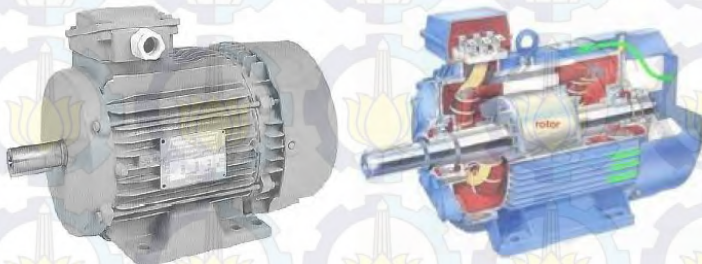
1.6. Relevansi atau Manfaat

Tugas akhir ini diharapkan dapat diaplikasikan sebagai metode pendeteksian kerusakan batang rotor pada motor induksi sangkar bajing yang lebih akurat, serta dapat menginspirasi untuk penelitian selanjutnya yang lebih dalam.

BAB 2 DASAR TEORI

2.1. Batang Rotor Sangkar Baging Motor Induksi

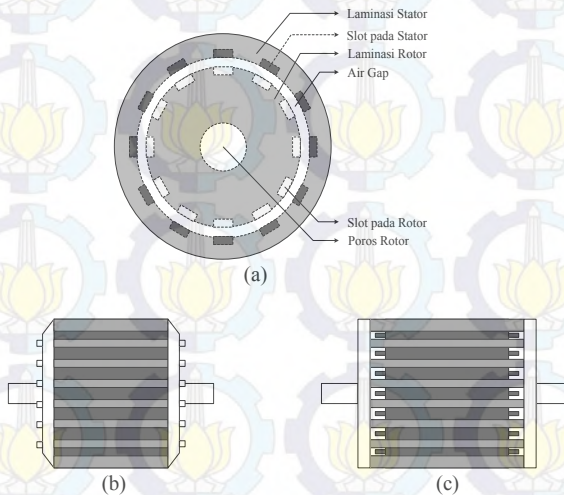
Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak – balik (AC) yang mampu mengonversi energi listrik menjadi energi mekanik, yang paling luas penggunaannya. Motor induksi banyak digunakan di dalam kehidupan sehari – hari baik di lingkungan industri maupun rumah tangga. Karena menggunakan arus bolak – balik, motor induksi dibedakan menjadi motor induksi satu fasa dan tiga fasa. Motor induksi tiga fasa digunakan pada sistem tenaga tiga fasa yang besar dengan kapasitas yang berat, seperti pada industri. Selain itu, pada motor induksi tiga fasa dibedakan menjadi dua jenis berdasarkan konstruksi batang rotor, yaitu jenis rotor sangkar baging (*squirrel cage*) dan satu fasa dengan daya keluaran yang rendah, seperti pada kebutuhan gelung (*wound*). Sedangkan motor induksi satu fasa digunakan untuk sistem tenaga rumah tangga.



Gambar 0.1. Motor induksi tiga fasa. [3]

Motor induksi rotor sangkar baging lebih banyak digunakan daripada jenis rotor gelung, sebab rotor sangkar baging mempunyai bentuk dan pengoperasian yang sederhana. Belitan rotor terdiri atas batang – batang penghantar yang ditempatkan dan disusun secara parallel di dalam alur rotor. Batang penghantar ini terbuat dari tembaga, *alloy*, atau aluminium. Ujung – ujung batang penghantar dihubungkan oleh cincin penghubung singkat, sehingga berbentuk seperti sangkar baging. Karena batang penghantar rotor yang telah dihubungkan, maka tidak dibutuhkan tahanan luar yang dihubungkan seri dengan rangkaian rotor pada saat awal berputar. Alur – alur rotor biasanya tidak

dihubungkan sejajar dengan sumbu (poros) tetapi sedikit miring untuk mengurangi *noise* karena bising.

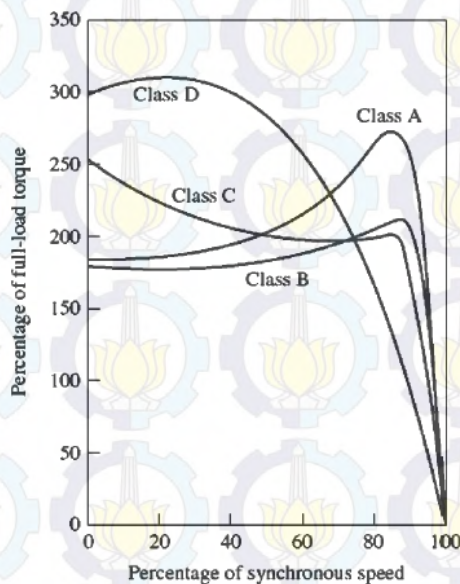


Gambar 0.2. Konstruksi motor sangkar induksi [4]
 (a) Bentuk Stator & Rotor Motor Induksi
 (b) Rotor *Die-cast* (c) Rotor dengan *end-ring*

Pada motor induksi rotor sangkar bajing, terdapat dua jenis bentuk rotor berdasarkan kapasitas motor. Untuk motor dengan kapasitas rendah, rotor dibuat dengan mengurangi derajat dari slip untuk beban yang diberikan, yang kemudian disempurnakan dengan meningkatkan konduktivitas pada konduktor rotor. Jenis rotor ini disebut juga dengan *die cast rotor*, yaitu dengan memadatkan konstruksi rotor berbahan tembaga maupun aluminium. Sedangkan pada motor berkapasitas besar, rotor dibuat dengan baja berlaminasi di inti dengan batang tembaga atau aluminium yang ditempatkan secara aksial di sekitar tepi rotor, dan dihubungkan secara permanen pada kedua ujung rotor. Jenis rotor ini dinamakan dengan *end ring rotor*. Kedua jenis rotor tersebut ditujukan untuk mengurangi rugi – rugi pada rotor. Sedangkan penggunaan tembaga untuk batang konduktor dan cincin rotor pada motor induksi merupakan salah satu usaha peningkatan efisiensi energi terhadap reduksi dari rugi – rugi yang signifikan. Permodelan motor oleh beberapa perusahaan manufaktur telah menunjukkan bahwa motor dengan rotor berbahan

tembaga dapat mengurangi rugi – rugi rotor sebesar 15 hingga 20% dibandingkan dengan rotor berbahan aluminium. Keuntungan lain menggunakan rotor berbahan tembaga yakni umur motor lebih panjang karena membangkitkan panas yang lebih rendah dan mengurangi tekanan termal, ukuran motor lebih kecil, dan biaya pembuatan motor lebih rendah.

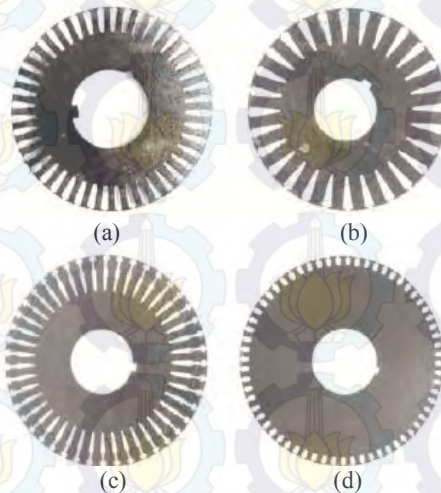
Motor induksi memiliki karakteristik yang berbeda – beda, bergantung pada jenis kelasnya. Karakteristik motor induksi digambarkan dalam kurva torsi beban penuh vs kecepatan, seperti pada Gambar 2.3 berikut:



Gambar 0.3. Karakteristik torsi vs kecepatan pada berbagai kelas motor induksi [5]

Berdasarkan Gambar 0.3, kelas motor induksi terbagi menjadi 4 kelas, yakni kelas A, B, C, dan D sesuai dengan desain yang ditetapkan oleh *National Electric Manufacturers Association* (NEMA) dan masing – masing kelas memiliki karakteristik masing – masing. Karakteristik ini berfungsi untuk menentukan tingkat kesesuaian motor induksi dalam mengatasi beban yang diberikan. Sehingga dapat diketahui jenis motor induksi yang cocok untuk beban yang bervariasi. Pada motor berdesain

A, torsi dan kecepatan berbanding lurus sampai pada kecepatan tertentu motor mencapai torsi beban penuh (*full load*), begitu kecepatan ditingkatkan, torsi akan kembali turun sampai nol. Untuk motor dengan desain B, torsi dan kecepatan berbanding lurus sampai pada kecepatan tertentu motor mencapai torsi beban penuh, sama seperti pada desain A, begitu kecepatan ditingkatkan, torsi akan kembali turun sampai nol. Desain ini memiliki torsi beban penuh yang lebih rendah dibandingkan dengan desain A namun memiliki torsi mula (*starting torque*) yang lebih tinggi. Sedangkan pada desain C, motor memiliki karakter torsi dan kecepatan sama dengan desain A dan B, namun memiliki torsi beban penuh yang lebih rendah dibandingkan dengan desain A dan lebih tinggi dibanding desain B. Motor berdesain C memiliki torsi mula yang lebih tinggi dibandingkan desain A dan B. Pada motor berdesain D, torsi dan kecepatan cenderung berbanding terbalik. Pada saat *starting*, torsi mula sudah sangat besar, dan cenderung menurun seiring kecepatan motor yang bertambah. Bentuk desain masing – masing kelas tersebut dapat dijelaskan melalui Gambar 2.4 berikut:



Gambar 0.4. Desain kelas rotor motor induksi sangkar bajing [5]:

- (a) Kelas A – Bar yang cukup lebar dengan jarak lebih dekat terhadap permukaan
- (b) Kelas B – Ukuran bar yang lebar dan dalam
- (c) Kelas C – Desain rotor bar sangkar ganda
- (d) Kelas D – Bar berukuran kecil dan berjarak dekat permukaan

Kelebihan motor induksi rotor sangkar bajing dibandingkan dengan rotor gelung antara lain mempunyai konstruksi yang sederhana dan biaya dan waktu perawatan yang rendah. Sedangkan kerugian dari motor induksi rotor sangkar bajing dibandingkan dengan rotor gelung adalah besar resistansi motor yang tetap sehingga besar arus mula (*starting current*) sulit dikendalikan dan sulit mengatasi beban dengan torsi awal yang besar. Namun kerugian tersebut dapat diatasi dengan mendesain bentuk rotor sehingga didapatkan karakteristik torsi – arus yang diinginkan.

2.2. Kerusakan Batang Rotor pada Motor Induksi Sangkar Bajing

Meskipun termasuk peralatan elektromekanis yang paling umum digunakan di industri karena memiliki tingkat kehandalan yang tinggi, bukan berarti motor induksi bebas dari gangguan dan kemungkinan kerusakan. Kerusakan yang sering terjadi di motor induksi dapat terletak pada bagian stator maupun rotornya.

Faktor – faktor yang dapat menyebabkan sebuah motor bisa mengalami kerusakan, dapat berasal dari beberapa sebab seperti dari gerakan peralatan, jaringan suplai yang termasuk dalam sistem kerja motor maupun keadaan lingkungan sekitar seperti faktor suhu, tekanan, dan mekanis, yang mempengaruhi sebuah motor tidak dapat menjalankan fungsinya secara normal. Kerusakan akibat gerakan peralatan dapat disebabkan oleh kopel yang terlalu besar dan naik turun, serta pengasutan dan pengereman yang terlalu sering dan juga terlalu lama. Sedangkan jaringan suplai dapat menimbulkan kerusakan pada motor dikarenakan besar tegangan yang kurang cocok, yakni terlalu tinggi atau terlalu rendah, serta tegangan fasa yang tak seimbang bagi motor tiga fasa. Keadaan lingkungan sekitar pun menjadi salah satu penyebab yang sering ditemukan pada beberapa kasus kerusakan motor, antara lain akibat suhu lingkungan yang terlalu tinggi, kurangnya udara pendingin, serta pengaruh getaran – getaran.

Penelitian gangguan motor induksi yang diakibatkan karena kerusakan pada rotor oleh IEEE – *Industrial Application Society* (IAS), ditemukan sebesar 8% dari total 1141 kasus kerusakan motor induksi, sedangkan berdasarkan survei yang dilakukan oleh *Electrical Power Research Institute* (EPRI) dilaporkan sebesar 9% dari total 6312 kasus kerusakan motor induksi [6]. Kedua penelitian tersebut berfokus pada mesin – mesin dengan ukuran medium. Sementara survei yang dilakukan

oleh Allianz yang berfokus pada mesin – mesin induksi besar bertegangan tinggi, menyatakan gangguan motor induksi akibat kerusakan rotor sebesar 13% sampai tahun 2012 lalu [6].

Kerusakan pada rotor bar (*broken rotor bar*) merupakan kegagalan pada motor induksi yang dapat menyebabkan kerusakan serius pada motor apabila tidak segera ditangani. Angka kerusakan rotor motor induksi berbanding lurus dengan kapasitas mesin. Kapasitas motor yang semakin besar, akan menambah probabilitas kerusakan pada rotor. Kategori motor tersebut biasanya dipekerjakan dengan torsi mula (*starting torque*) yang tinggi untuk aplikasi yang lebih krusial, dimana tekanan suhu lebih besar akibat arus mula (*starting current*) yang lebih tinggi. Beberapa penyebab lain kerusakan rotor motor induksi antara lain: adanya tingkat pemanasan yang sangat parah, adanya gesekan dan benturan saat proses perawatan motor, proses manufaktur motor yang kurang sempurna, dan lain sebagainya.

Faktor – faktor yang umum mempengaruhi kerusakan batang rotor sangkar, yaitu gesekan, suhu, dan variasi beban. Pengaturan putaran motor berperan penting dalam mencegah terjadi kerusakan pada motor listrik. Putaran yang tidak stabil menyebabkan rotor tidak seimbang, sehingga berakibat cepatnya aus bagian yang bergesek. Selain itu, faktor termal juga tak jarang menjadi penyebab kerusakan rotor. Sejalan dengan lamanya motor beroperasi, maka berbanding lurus dengan peningkatan suhu. Naiknya suhu dalam motor menyebabkan pemuaian terjadi yang dapat berujung ke kerusakan, berupa retakan, lubang, maupun bentuk kerusakan lainnya. Kerusakan batang rotor juga dapat disebabkan oleh kecacatan karena kesalahan dalam proses produksi dan manufaktur motor.



Gambar 0.5. Kerusakan batang rotor karena rusaknya laminasi rotor akibat tingkat pemanasan yang parah [7]

Pada saat motor dinyalakan atau kondisi *starting*, khususnya pada penggunaan DOL (*Direct On – Line*) starter, arus rotor pada motor

induksi sangat tinggi kurang lebih lima sampai enam kali lebih besar dibandingkan dengan arus normal pada keadaan tunak. Pada kondisi tersebut, kerusakan pada rotor menjadi lebih jelas dibandingkan dengan saat motor induksi telah mencapai kondisi *steady state*. Sedangkan kekurangan dari analisis yang dilakukan pada kondisi mula motor yaitu kecepatan motor yang masih mudah berubah sehingga dapat mempengaruhi besar amplitudo tegangan dan frekuensi, serta periode yang dibutuhkan untuk mengamati efek kerusakan berlangsung sangat cepat. Selain pada kondisi *starting*, pendeteksian kerusakan pada rotor lebih menghasilkan hasil yang jelas pada kondisi tanpa beban.

Apabila terdapat *broken rotor bar* yang cukup, motor tidak dapat menjalankan operasi karena tidak mampu membangkitkan torsi percepatan yang cukup. Sedangkan untuk mengganti atau memperbaiki batang rotor membutuhkan waktu yang cukup lama serta biaya yang tinggi. Oleh karena itu, sangat penting untuk mendeteksi kerusakan batang rotor saat kerusakan yang timbul masih kecil sedari dini. Beberapa efek sekunder umum dari kerusakan batang rotor antara lain:

1. Dapat menyebabkan timbulnya bunga api (*sparking*) pada daerah berbahaya, sehingga menjadi perhatian serius.
2. Jika satu atau lebih rotor bar yang rusak, maka bar sehat dipaksa untuk membawa tambahan arus atau berkerja lebih berat. Hal ini dapat menyebabkan kerusakan inti rotor dari suhu tinggi yang terus menerus di sekitar bar yang rusak dan arus yang melewati inti rotor dari bar yang rusak ke bar yang normal.
3. Dapat menimbulkan osilasi torsi dan kecepatan pada rotor, sehingga dapat menimbulkan keausan pada *bearing* atau komponen penggerak lainnya.
4. Kantong udara yang besar pada belitan rotor *die cast* berbahan campuran aluminium dapat menyebabkan ekspansi bar yang tak seragam. Hal ini menimbulkan rotor bengkok dan tak seimbang yang menjadi penyebab tingkat getaran yang tinggi dari keausan *bearing*.
5. Saat rotor berputar pada kecepatan radial yang tinggi, *broken bar* dapat terangkat keluar dari slot dikarenakan gaya sentrifugal dan membentur belitan stator, dimana hal ini dapat menyebabkan kegagalan motor yang parah.
6. Rotor asimetri, baik statis maupun dinamis. Dapat menyebabkan rotor bergesekan dengan belitan stator,

menimbulkan kerusakan inti rotor dan kegagalan motor yang besar pula.

Saat ini telah dikembangkan beberapa metode yang digunakan untuk mendeteksi kerusakan rotor bar secara dini. Salah satunya melalui metode analisis bentuk gelombang arus motor induksi atau biasa dikenal dengan *Motor Current Signature Analysis* (MCSA).

2.3. Motor Current Signature Analysis (MCSA)

Motor Current Signature Analysis (MCSA) telah terbukti sebagai peranti perawatan yang prediktif dan berharga. Meskipun tergolong teknologi yang masih muda, metode ini semakin berkembang pesat dan dapat diterima di banyak lini industri saat ini. Kegagalan mekanik yang berhubungan dengan sekrup, sabuk, stator, dan rotor, serta seluruh elemen mesin yang membutuhkan keselarasan, lebih mudah ditemukan melalui penggunaan spektrum saat didemodulasi pada MCSA.

MCSA merupakan proses dimana pembacaan arus motor dicatat dan dianalisis dalam domain frekuensi. Metode tersebut menyatakan bahwa adanya perbedaan yang signifikan pada spektrum harmonisa antara arus stator motor induksi dalam keadaan normal atau sehat dan pada kondisi rusak. Metode ini telah ada sejak tahun 1985 dan telah dipercaya selama bertahun – tahun dalam menemukan kesalahan rotor dan masalah celah udara (*air gap*) di motor. Selain itu, beberapa kondisi lain yang mampu dideteksi dengan menggunakan MCSA antara lain [8]:

1. Kondisi belitan stator
2. Kondisi rotor
3. Gangguan dinamis dan statis pada celah udara (*air gap*)
4. Kondisi kopling, termasuk sistem pada sabuk dan gir
5. Kondisi pembebanan
6. Sistem dan efisiensi pembebanan
7. Kondisi *bearing*

Langkah – langkah dasar yang dapat digunakan untuk analisis menggunakan MCSA sebagai berikut [8] :

1. Proses pemetaan terhadap seluruh bagian sistem yang akan dianalisis.
2. Proses pendefinisian kerusakan yang terjadi pada sistem, selanjutnya lakukan analisis terhadap data-data yang mengindikasikan kerusakan tersebut.
3. Proses pengambilan data.
4. Proses *review* dan analisis meliputi :

- 1) *Review* pengambilan data dengan periode waktu tertentu (misalkan 10 detik) untuk melihat bagaimana kondisi operasi yang terjadi selama periode waktu tertentu tersebut.
- 2) *Review* arus *input* motor induksi dengan tingkat modulasi frekuensi rendah untuk melihat kondisi rotor dan kondisi pembebanan
- 3) *Review* arus *input* motor induksi dengan tingkat modulasi frekuensi tinggi untuk mendefinisikan kondisi motor induksi secara elektrik dan mekanis

Dalam teori MCSA ini, proses pendeteksian terhadap kerusakan rotor bar dapat diamati melalui frekuensi harmonisa yang muncul sebagai *side band* pada sinyal utama, yang berdasarkan pada Persamaan (2.1) di bawah ini:

$$(1 \pm 2ks)fs \quad (2.1)$$

Dengan:

k = Konstanta integer

s = Per unit slip

f_s = Frekuensi suplai

2.4. *Empirical Mode Decomposition (EMD)*

Dalam teknik analisis data telah ditemukan suatu metode oleh N.E. Huang, dengan menggabungkan Transformasi Hilbert – Huang (HHT), yaitu *Empirical Mode Decomposition (EMD)*. Transformasi ini merupakan sebuah metode untuk mendekomposisi atau menguraikan sinyal ke dalam bentuk *Intrinsic Mode Function (IMF)*. Metode ini berlaku untuk semua jenis data stasioner maupun nonstasioner dan nonlinear. Berbeda dengan Transformasi Fourier, HHT lebih berupa algoritma (pendekatan empiris) yang dapat diaplikasikan ke kumpulan data.

Bagian paling fundamental dari HHT adalah metode EMD. Dengan menggunakan metode EMD, kumpulan data rumit apapun dapat diuraikan ke dalam bentuk *finite* atau memiliki batasan, dan tak jarang sejumlah kecil komponen. Komponen tersebut membentuk mendekati basis orthogonal yang komplit untuk sinyal asli. Atau dapat disebut juga dengan IMF. Tanpa mengesampingkan domain waktu, EMD adalah metode yang adaptif dan berefisiensi tinggi. Karena penguraian berbasis

pada karakteristik skala waktu lokal dari data, maka EMD dapat digunakan untuk proses nonlinear dan nonstasioner. Sedangkan untuk memastikan sebuah IMF dapat dikatakan sebuah fungsi apabila memenuhi syarat sebagai berikut:

1. Dalam seluruh kumpulan data, jumlah *extrema* sama dengan jumlah *zero-crossing* atau memiliki selisih setidaknya satu.
2. Pada titik manapun, nilai mean atau rata – rata dari *envelope* yang didefinisikan oleh *local maxima* dan *envelope* yang didefinisikan oleh *local minima* adalah nol.

Hal ini merepresentasikan sebuah mode osilasi sederhana yang umum sebagai pasangan dari fungsi harmonik sederhana. Secara definisi, IMF merupakan sebuah fungsi yang memiliki jumlah *extrema* dan *zero-crossing* yang sama, dan *envelope* yang simetris sehubungan dengan nol.

Fakta bahwa semua fungsi – fungsi dalam sinyal yang diuraikan dalam domain waktu dan memiliki panjang yang sama dengan sinyal asli, memperbolehkan untuk memvariasikan frekuensi dalam waktu yang ditentukan. Mendapatkan IMF dari sinyal asli sangat penting karena proses natural sering memiliki banyak penyebab, masing – masing dari penyebab tersebut dapat terjadi pada interval waktu yang spesifik. Jenis tipe data ini jelas sekali dalam analisis EMD, namun tidak terlalu jelas dalam domain Fourier ataupun koefisien Wavelet.

Beberapa contoh data yang dapat diselesaikan dengan metode EMD secara cukup efektif adalah pembacaan seismik, hasil eksperimen ilmu syaraf, elektrokardiogram, gastroelektrogram, dan pembacaan tinggi permukaan laut.

2.5. Standar Deviasi

Standar deviasi adalah nilai statistik yang digunakan untuk menentukan bagaimana sebaran data dalam suatu sampel, dan seberapa dekat titik data individu ke nilai rata – rata (*mean*). Standar deviasi disebut pula sebagai simpangan baku, yakni suatu nilai yang menunjukkan tingkat atau derajat variasi kelompok data atau ukuran standar penyimpangan dari nilai rata – ratanya. Sebuah standar deviasi dari kumpulan data sama dengan nol menunjukkan bahwa semua nilai dalam himpunan tersebut adalah sama. Semakin besar nilai suatu standar deviasi berbanding lurus dengan jarak data individu dari nilai rata – rata.

Untuk menghitung standar deviasi, langkah pertama dilakukan perhitungan nilai rata – rata dari semua titik data. Rata – rata adalah jumlah dari seluruh nilai kumpulan data yang dibagi dengan jumlah total

titik data. Selanjutnya penyimpangan setiap titik data dari rata – rata dihitung dengan mengurangkan nilai dari nilai rata – rata. Deviasi setiap titik data akan dikuadratkan, dan dicari penyimpangan kuadrat individu rata – rata. Nilai yang dihasilkan tersebut adalah varians. Sedangkan standar deviasi merupakan akar kuadrat dari varians. Rumus dari standar deviasi untuk data tunggal dan data berkelompok (memiliki frekuensi), dapat dijelaskan melalui Persamaan (2.2) dan (2.3) sebagai berikut :

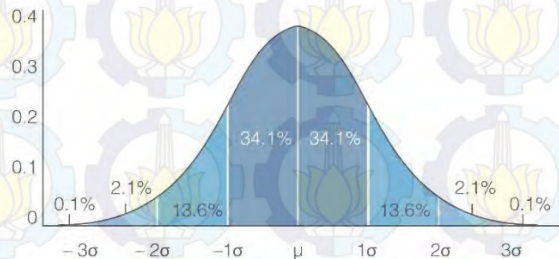
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \mu)^2}{N}} \quad (2.2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum f_i (X_i - \mu)^2}{(\sum f_i)}} \quad (2.3)$$

Dengan:

- σ = Standar deviasi
- X_i = Data ke-i
- μ = Rata – rata (*mean*)
- f_i = Frekuensi ke-i
- N = Jumlah data

Standar deviasi dalam distribusi normal data, dikenal pula sebagai kurva lonceng berbentuk seperti genta setangkup yang simetris yang disebut pula dengan kurva normal, seperti pada Gambar 2.6 berikut :



Gambar 0.6. Contoh kurva lonceng pada distribusi normal untuk menggambarkan standar deviasi. [9]

Jika X merupakan suatu peubah acak normal dengan nilai tengah berupa rata – rata (μ) dan ragam berupa varians (σ^2), maka Persamaan kurva lonceng pada distribusi normal dapat dijelaskan melalui Persamaan (2.3) sebagai berikut:

$$n(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\frac{1}{2\sigma^2}(x-\mu)^2} \quad (2.3)$$

Dengan:

- σ = Standar deviasi
- μ = Rata – rata (*mean*)
- π = 3.14159....
- e = 2.71828....

Pada kurva distribusi normal ini, penyajian data disajikan dalam bentuk fungsi probabilitas kepadatan atau *Probability Density Function* (PDF) yang merupakan fungsi yang sering digunakan dalam teori statistika untuk menjelaskan perilaku suatu distribusi probabilitas teoretis. Fungsi ini memiliki kerapatan $f(x)$ yang merupakan fungsi integrasi dalam interval $[a,b]$ seperti pada Persamaan (2.4) berikut:

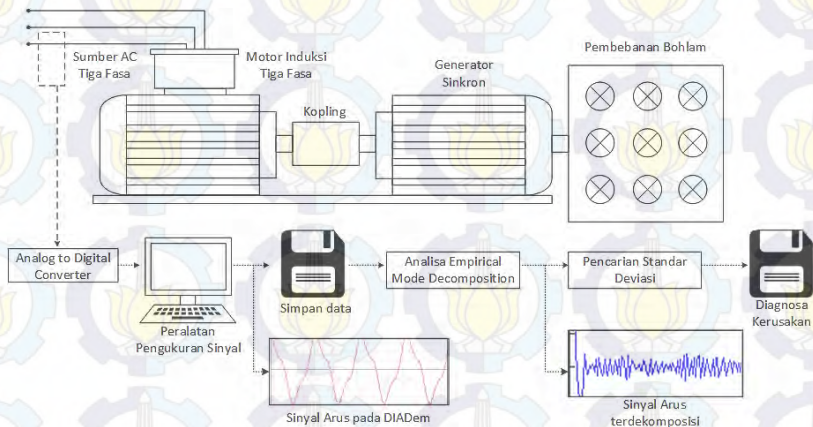
$$\Pr[a \leq X \leq b] = \int_a^b f(x)dx \quad (2.4)$$

BAB 3

PERANCANGAN SISTEM DETEKSI KERUSAKAN BATANG ROTOR MOTOR INDUKSI MENGUNAKAN METODE STANDAR DEVIASI BERBASIS *EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION*

3.1. Konfigurasi Sistem

Sistem yang digunakan pada Tugas Akhir ini menggunakan metode standar deviasi berbasis mode dekomposisi empiris (EMD). Pengukuran yang dilakukan berdasarkan pada pencuplikan arus stator motor induksi rotor sangkar baging. Sistem ini membutuhkan beberapa peralatan seperti motor induksi 3 fasa rotor sangkar baging, generator sinkron, DAQ, beberapa peralatan pengukuran serta seperangkat *listing* pengolahan sinyal dalam sebuah *software* terprogram. Gambaran sistem deteksi kerusakan batang rotor motor induksi berbasis EMD pada Tugas Akhir ini secara sederhana ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 0.1. Gambaran sistem dalam Tugas Akhir

Pada Tugas Akhir ini digunakan motor induksi 3 fasa rotor sangkar baging berkapasitas sebesar 2 HP atau setara dengan 1,492 kW. Motor induksi dirangkai dengan belitan Y sehingga memiliki tegangan dan arus *rating* sebesar $V_t = 380$ V dan $I_a = 0,6$ Ampere. Sistem pengukuran juga melibatkan peralatan pembebanan mekanis yang berupa

generator yang terkopel dengan motor. Sementara generator sendiri dibebani listrik secara bervariasi sejumlah empat jenis yaitu 0, 300, 600, dan 900 Watt. Perbedaan pembebanan yang diberikan bertujuan untuk mengetahui perbedaan sebaran data untuk tiap kondisi motor. Pengambilan data dilakukan pada frekuensi sampling sebesar 5 kHz dengan panjang 25.000 titik sampel per sinyal arus stator, sehingga waktu yang dibutuhkan untuk setiap pencuplikan selama 5 detik. Dengan parameter tersebut, lama periode sampling adalah 0,2 milisekon. Pencuplikan ini dilakukan sebanyak 25 kali sampling untuk masing – masing kondisi motor. Penetapan nilai parameter pensamplingan dilakukan berdasarkan Persamaan (3.1) dan (3.2) berikut mengenai data sampling.

$$fs = \frac{n}{t} \quad (3.1)$$

$$Ts = \frac{1}{fs} \quad (3.2)$$

Dengan:

fs = Frekuensi sampling

n = Banyak data

t = Waktu total yang dibutuhkan

Ts = Periode sampling

Tabel 0.1, 3.2 dan 3.3 menjelaskan mengenai peralatan yang digunakan dalam Tugas Akhir ini.

Tabel 0.1. Data motor induksi 3 phasa

Parameter Motor Induksi	Nilai
Merk	Tatung
Daya Rating	1,5 kW / 2 Hp
Jumlah Pole	4
Tegangan Rating	380 V (koneksi Y)
Arus Rating	3,44 A
Kecepatan Rating	1380 rpm
Jumlah Konduktor Rotor (Bar)	28
Faktor Daya	0,66
Frekuensi	50 Hz
IP	55

Tabel 0.2. Data DAQ [10] [11]

Parameter Akuisitor Data	Nilai
Merk	National Instrument
cDAQ-9171	
Deskripsi	NI CompactDAQ 1-Slot USB Chassis
Suplai Sumber	AC 4.75/5.25 V 5/500 Hz
Daya Total	2.6 Watt
Resolusi	32 Bit
NI 9246	
Deskripsi	Continuous Analog Input Module
Interval Pengukuran	AC 22Arms Continuous ± 30 Apeak input 50/60 Hz
Isolasi	300 Vrms V_{LN} 480 Vrms V_{LL} CAT II (screw terminal)
Sampling per channel	50kS/s
Resolusi	24 Bit
Temperatur	-40°C to 70°C

Tabel 0.3. Data generator sinkron

Parameter Generator Sinkron	Nilai
Merk	Shantou
Daya Rating	5 kW / 6.25 kVA
Jumlah Pole	4
Tegangan Rating	400 V (koneksi Y)
Arus Rating	9.02 A
Kecepatan Rating	1500 rpm
Frekuensi	50 Hz
Faktor Daya	0,8
Kelas Isolasi	Stator: E / Rotor: B

Kondisi motor yang dijadikan eksperimen sebanyak lima buah, yaitu kondisi motor normal yang sehat, kondisi motor dengan kerusakan rotor sedalam 3 mm berjumlah satu dan tiga bar, dan kondisi motor dengan kerusakan sedalam 7 mm berjumlah satu dan tiga bar. Baik dalam kondisi rotor normal maupun berbentuk *broken bar*, level pembebanan

yang diberikan sama untuk masing – masing kondisi. Untuk metode EMD ini, pengambilan data dilakukan dalam keadaan tunak (*steady state*).

Motor induksi menggunakan koneksi belitan Y (wye atau bintang) dengan tegangan suplai optimal pada motor sebesar 380 V dan arus nominal sebesar 3,44 Ampere. Sedangkan data akuisitor yang digunakan memiliki batas tegangan kerja dalam batas maksimal 20 Ampere rms dan 30 Ampere peak.

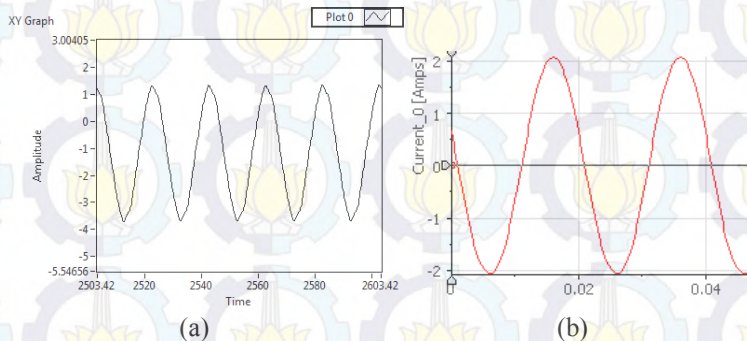


Gambar 0.2. Peralatan yang dibutuhkan:

- (a) Motor induksi 3 fasa 2HP
- (b) Generator sinkron
- (c) Data akuisitor
- (d) Power analyzer
- (e) Load bank

Peralatan yang digunakan untuk data akuisisi atau konverter analog ke digital adalah National Instrument cDAQ-9171 dan 9246 *Input Module*. Proses pengambilan data arus stator menggunakan kabel yang disalurkan ke NI 9246 untuk diakuisisi dalam cDAQ-9171 dari sinyal analog menjadi bentuk digital sebelum selanjutnya dialirkan ke motor untuk suplai statornya. Sinyal arus stator tersebut yang telah berbentuk digital diolah lagi menggunakan *software* LabVIEW.

Dalam LabVIEW, data sinyal diolah lebih lanjut. Pengolahan data sinyal pada LabVIEW ini difokuskan pada sampling data menggunakan frekuensi sampling 5 kHz selama 5 detik sehingga jumlah titik sampel yang didapatkan sebanyak 25.000 data. Hasil sampling ini ditampilkan dalam bentuk data numerik dan grafis. Data numerik merupakan deskripsi data berupa angka sebagai posisi persebaran titik yang membentuk gelombang sinyal. Sedangkan data grafis adalah sajian data yang menginformasikan bentuk gelombang sinyal dalam gambar yang dipresentasikan dalam program LabVIEW tersebut. Kedua data tersebut disajikan dalam format file TDMS (*Technical Data Management Streaming*) yang dapat dibaca melalui Microsoft Excel dan *software* DIAdem. Data keluaran (*output*) dari LabVIEW tersebut menjadi masukan (*input*) untuk selanjutnya diolah dalam *listing* program pada *software* MATLAB.

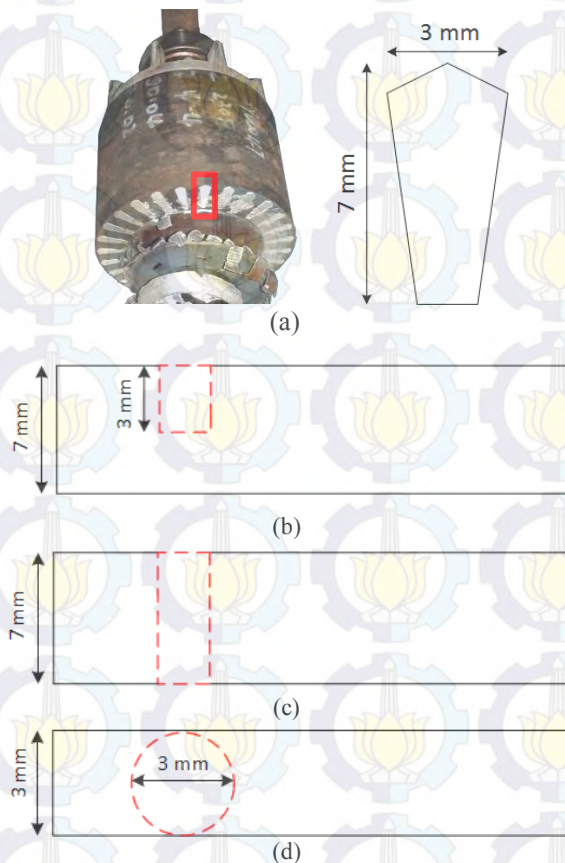


Gambar 0.3. Bentuk sinyal arus asli pada (a) *software* LabVIEW dan (b) DIAdem

Pada Tugas Akhir ini dititikberatkan pada pendeteksian kerusakan bar rotor berdasarkan kondisi arus motor. Data masukan yang digunakan ialah arus stator salah satu fasa dari motor induksi tiga fasa.

3.2. Pengkondisian Kerusakan Batang Rotor Motor Induksi

Kondisi kerusakan bar pada batang rotor dapat dijelaskan dengan Gambar 3.4 berikut:



Gambar 0.4. (a) Bentuk penampang bar rotor

Bentuk pengkondisian kerusakan bar rotor tampak samping:

(b) Kerusakan sedalam separuh dari kedalaman total

(c) Kerusakan sedalam kedalaman total

Dan kerusakan bar rotor tampak atas:

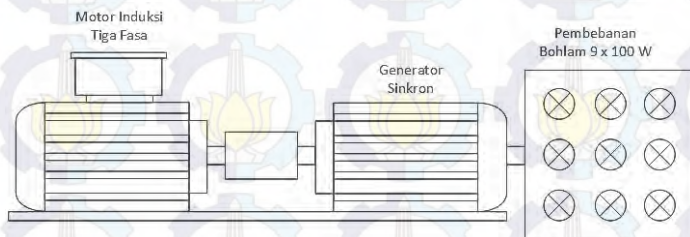
(d) Seluruh kerusakan berdiameter 3 mm

Pengkondisian kerusakan bar pada batang rotor motor induksi dilakukan dengan memberikan kecacatan pada bagian tersebut. Kerusakan dibuat melewati batang konduktor namun masih pada batas aman. Hal ini ditujukan untuk pencegahan apabila terjadi bunga api pada kasus motor dengan batang rotor yang telah rusak parah. Rekonstruksi kerusakan pada eksperimen dilakukan dengan melubangi bar rotor dengan menggunakan mesin bor dalam dua kondisi. Kasus pertama membuat lubang sedalam separuh dari kedalaman bar (3 mm dari total kedalaman bar 7 mm), dan kasus kedua berupa kerusakan dengan lubang sedalam kedalaman bar atau pembuatan lubang hingga menembus sisi sebaliknya (7 mm).

Pada Tugas Akhir ini eksperimen dilakukan pada tiga jenis kondisi motor, yakni motor dalam keadaan normal atau sehat tanpa gangguan, motor dengan (a) kerusakan batang rotor sedalam separuh dari kedalaman total, dan (b) motor dengan satu *broken bar* berupa kerusakan sedalam kedalaman total bar.

3.3. Pembebanan Elektris

Proses pengambilan data tidak hanya dilakukan dengan perbedaan jumlah dan kedalaman kerusakan pada rotor bar, namun juga dengan memvariasikan besar pembebanan pada motor. Tujuan adanya variasi pembebanan ini sebagai prototipe dari kondisi operasi dalam industri atau sektor ketenagalistrikan lain dengan jumlah beban yang berbeda – beda. Besar pembebanan yang terjadi dapat mempengaruhi magnitude dan bentuk sinyal arus dari motor induksi tersebut. Pada Tugas Akhir ini motor induksi tiga fasa dikopel dengan generator sinkron yang dibebani oleh rangkaian bola lampu dengan daya masing – masing sebesar 100 Watt. Skema pembebanan elektrik pada motor induksi tersebut dapat digambarkan dalam Gambar 3.5 berikut:



Gambar 0.5. Skema pembebanan elektrik pada Tugas Akhir.

Motor induksi yang digunakan memiliki daya rating sebesar 1,5 kW atau kira – kira setara dengan 2 HP. Oleh karena itu, total beban yang dapat diberikan maksimal sebesar 1.500 Watt atau setara dengan total daya keluaran maupun input motor. Dengan terkopelnya motor dengan generator sinkron, besar daya akhir yang dihantarkan pada bola lampu akan mengalami perbedaan diakibatkan rugi – rugi yang ada. Variasi beban pada generator dilakukan secara bertahap dalam empat tingkat, yaitu pada keadaan 0 Watt atau tanpa beban, 300 Watt atau 3 buah bohlam, 600 Watt atau 6 buah bohlam, dan 900 Watt atau sebanyak 9 buah bohlam. Bohlam yang dibebankan pada generator sinkron secara tidak langsung juga membebani motor induksi yang telah terkopel dengan generator tersebut. Selain itu, kondisi yang diukur maupun diobservasi juga melibatkan situasi motor yang beroperasi tanpa terkopel dengan generator yang merupakan beban sejati motor.

Adanya variasi beban yang diberikan terhadap motor induksi dapat menyebabkan timbulnya vibrasi atau getaran pada generator maupun motor induksi yang sedang beroperasi. Efek samping inilah yang mengakibatkan adanya kesalahan dalam pengukuran sehingga menyebabkan error yang mungkin terjadi. Sehingga pendeteksian kerusakan bar rotor dapat menjadi kurang akurat dan butuh pengulangan kembali.

3.4. Listing EMD

Pada Tugas Akhir ini, metode yang digunakan dalam pendeteksian kerusakan batang rotor pada motor induksi sangkar bajing adalah standar deviasi yang berbasis pada analisis *Empirical Mode Decomposition*. Metode ini dipilih karena cukup mudah namun menghasilkan hasil yang cukup akurat. Metode ini merupakan teknik nonlinear yang menonjolkan penguraian arus stator ke dalam bentuk intrinsiknya yang lebih sederhana atau *Intrinsic Mode Function* (IMF), sehingga dapat diketahui perbedaan persebaran data atau standar deviasi dari berbagai jenis kondisi motor. Kelebihan dalam penggunaan EMD dibandingkan dengan metode yang lain yaitu EMD termasuk proses adaptif karena masing – masing IMF dibentuk berdasarkan informasi sinyal yang sama yang diproses dalam masing – masing iterasi, tidak seperti Transformasi *Wavelet*. Selain itu, metode EMD mengolah banyak data dalam banyak sampling atau dengan kata lain tidak hanya bertumpu pada satu data, sehingga mengerucutkan kemungkinan kesalahan data oleh vibrasi atau faktor lainnya yang dapat merusak data.

Analisis EMD dilakukan dengan menggunakan *software* pengolah sinyal terprogram MATLAB, setelah dilakukan pengambilan data arus stator motor induksi rotor sangkar bajing. Proses fundamental pada alur metode ini terletak pada dekomposisi sinyal arus stator atau $X(t)$ ke dalam bentuk intrinsiknya. Sinyal analog yang telah dikonversikan ke dalam bentuk digital, ditentukan nilai *extrema*-nya dan diidentifikasi untuk mencari nilai *local minima* dan *local maxima*. Kedua nilai tersebut kemudian diolah kembali menggunakan interpolasi *cubic spline* untuk mendapatkan bentuk *envelope*, *upper* dan *lower envelope* dari sinyal. Dari kedua *envelope* tersebut dihitung nilai rata – ratanya (*mean*) atau m_1 . Sehingga bentuk intrinsik sinyal dapat ditemukan dengan hasil pengurangan dari sinyal utama dengan *mean* tersebut.

$$X(t) - m_1 = h_1 \quad (3.3)$$

Sedangkan untuk memastikan bahwa bentuk intrinsik yang telah ditemukan atau h_1 dapat dikategorikan sebagai IMF, sinyal harus memenuhi kedua syarat IMF sebagai berikut:

1. Jumlah *extrema* sama dengan jumlah *zero crossing* dengan toleransi memiliki selisih sebesar satu (1).
2. Sinyal intrinsik memiliki rata – rata sebesar nol (0).

Apabila h_1 belum termasuk IMF maka iterasi dilakukan hingga kedua syarat tersebut dipenuhi hingga k kali.

$$h_{1(k-1)} - m_{1k} = h_{1k} \quad (3.4)$$

Sebagai kriteria pemberhenti dari metode ini, digunakan pencarian nilai standar deviasi seperti pada Persamaan (3.5) berikut:

$$SD = \sum_{t=0}^T \left[\frac{h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t)^2}{h_{1(k-1)}^2(t)} \right] \quad (3.5)$$

Pengolahan sinyal dilanjutkan dengan melakukan pengidentifikasian dan pengeliminasian *zero crossing* dalam sinyal tersebut. Setelah itu digunakan proses statistika akhir berupa perhitungan nilai standar deviasi dari persebaran data yang tersisa. Pencarian nilai standar deviasi dimaksudkan untuk mengetahui perbedaan nilai antara kondisi motor normal yang sehat dengan kondisi motor dengan *broken*

bar. Secara garis besar, metode standar deviasi berbasis analisis EMD ini dapat dijelaskan dalam diagram alir pada Gambar 3.6 berikut:



Gambar 0.6. Diagram alir EMD

BAB 4

PENGUJIAN SISTEM DETEKSI KERUSAKAN BATANG ROTOR MOTOR INDUKSI MENGUNAKAN METODE STANDAR DEVIASI BERBASIS *EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION* DAN ANALISIS DATA

Pada bab ini dijelaskan terkait hasil pengujian sistem yang telah dilakukan untuk selanjutnya dipaparkan analisis mengenai pengolahan data dari sistem pendeteksian kerusakan rotor bar (*broken rotor bar*) yang ada. Sistem yang diterapkan seperti yang sudah dibahas di bab sebelumnya, bekerja pada saat motor dalam kondisi *on-line* atau beroperasi serta menggunakan arus stator ketika tunak atau *steady state*. Sistem tersebut ditunjang dengan peralatan pencuplikan arus dan beberapa jenis *software* terprogram. Proses pensamplingan arus motor ini dilakukan dengan menggunakan cDAQ National Instrument yang diatur menggunakan *software* LabVIEW.

Pengujian sistem deteksi dilakukan dalam lima jenis kasus, yaitu saat motor masih dalam kondisi normal dan sehat, saat satu rotor bar rusak sedalam 3 dan 7 mm, serta adanya kerusakan pada tiga rotor bar sedalam 3 dan 7 mm. selain itu, sistem juga dilakukan pada lima tingkat pembebanan pada motor, yakni ketika motor beroperasi tanpa dikopel dengan generator, dan motor beroperasi yang telah terkopel dengan generator yang dibebani oleh rangkaian bohlam dengan variasi daya yang berbeda sebesar 0 Watt, 300 Watt, 600 Watt, dan 900 Watt. Adanya pembebanan listrik pada generator ini secara tidak langsung akan mempengaruhi kerja motor. Semakin tinggi daya yang harus disuplai oleh generator untuk memenuhi beban, maka akan berbanding lurus dengan kecepatan putar rotor dari generator. Terkopelnya rotor generator dan rotor motor menyebabkan peningkatan induksi elektromagnetik yang terjadi antara stator dengan rotor pada motor induksi. Sehingga perubahan beban bohlam pada generator juga dapat mengubah kondisi arus stator motor. Namun, besar beban listrik pada generator ini tidak sama nilainya dengan besar beban motor asli. Meskipun motor induksi yang digunakan memiliki rating daya input dan output masing – masing sebesar 1.500 Watt dan 2 HP, adanya rugi – rugi yang terjadi dalam motor maupun hubungannya dengan generator membuat daya yang dihasilkan oleh motor berbeda dengan daya pada beban generator. Perbandingan besar

daya beban yang terpasang pada generator dengan daya input motor induksi dapat dijelaskan melalui Tabel 4.1 berikut :

Tabel 0.1. Perbandingan daya input motor dengan daya beban berupa bohlam

Hubungan dengan Generator	Daya Input Motor (W)	Bohlam	
		Daya (W)	Jumlah
Tidak terkopel	100	-	-
Terkopel	900	0	0
Terkopel	1.100	300	3
Terkopel	1.300	600	6
Terkopel	1.500	900	9

4.1. Pencuplikan Sinyal Arus Stator Menggunakan cDAQ 9171 dan *Software LabVIEW* serta DIAdem

Tahap pertama yang dilakukan pada pengujian sistem deteksi kerusakan rotor bar ini adalah pensamplingan atau pencuplikan sinyal arus stator pada motor induksi yang bersangkutan. Proses pensamplingan ini dimulai dengan pengonversian bentuk analog arus ke digital melalui alat cDAQ 9171 dan NI 9246.

Tabel 0.2. Nilai amplitudo tertinggi arus rata-rata setiap kasus

Kondisi Motor	Arus Puncak Rata – rata (A)				
	100 W	900 W	1.100 W	1.300 W	1.500 W
Normal	2.0783	2.1097	2.6043	3.4485	3.6894
1 BRB 3 mm	1.9833	2.5567	3.1835	3.7506	4.2288
1 BRB 7 mm	2.0131	2.1610	2.9108	3.1447	4.1389
3 BRB 3 mm	1.9555	1.9810	2.6936	3.1865	3.8015
3 BRB 7 mm	1.9511	2.1825	3.1005	3.7585	4.3132

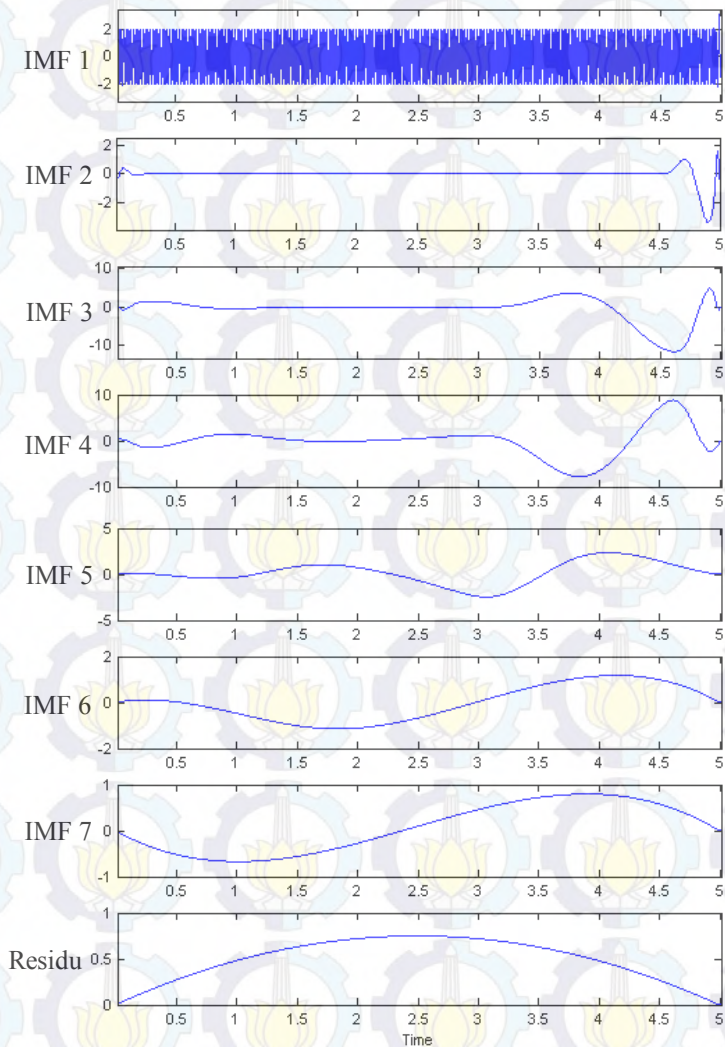
Pada Tabel 4.2 dapat diketahui bahwa kerusakan rotor bar pada motor induksi tidak mempengaruhi nilai amplitudo maksimum secara signifikan, khususnya pada saat motor tidak dibebani. Dengan hasil seperti ini, cukup sulit untuk dapat mendeteksi langsung hanya dari

observasi nilai arus. Oleh karena itu diperlukan penguraian lebih dalam mengenai sinyal arus stator menggunakan dekomposisi empiris dan perhitungan statistika untuk dapat mendeteksi kerusakan secara lebih akurat. Untuk mengatur parameter yang dibutuhkan dalam sampling, digunakan *software* LabVIEW. Sesuai dengan pembahasan sebelumnya, sampling dilakukan dalam frekuensi 5.000 Hz dengan jumlah data tiap sampel sebanyak 25.000 data sehingga waktu yang dibutuhkan masing – masing sampel selama 5 detik. Tahap ini diulangi sebanyak 24 kali tiap kasus yang terjadi pada motor induksi sehingga didapatkan 25 sampel per kasus.

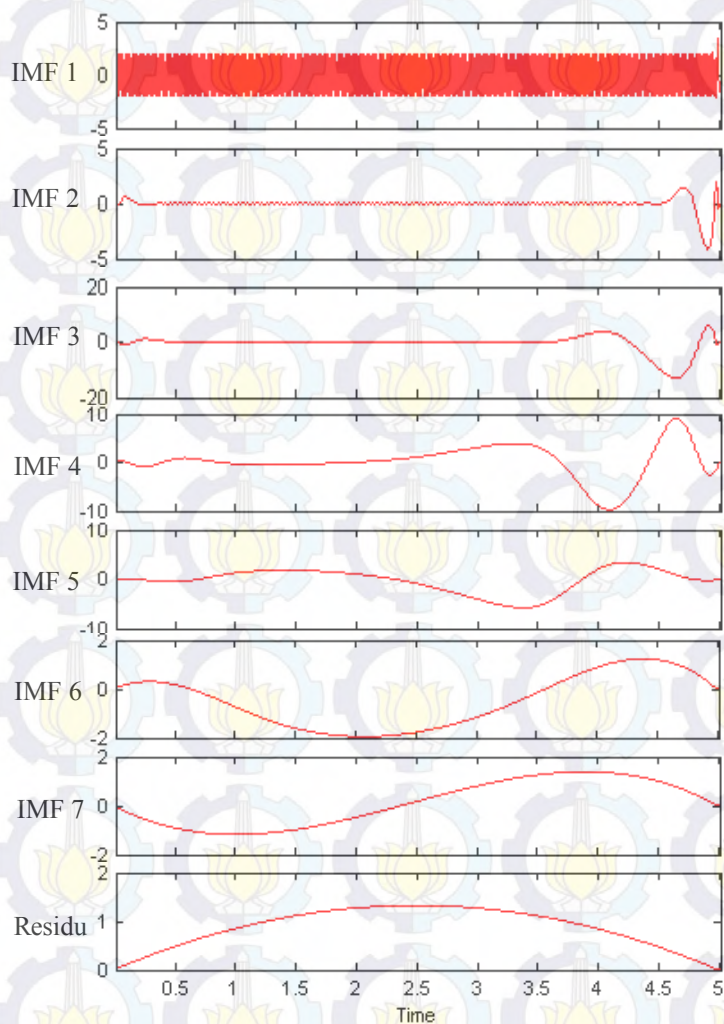
4.2. Pengolahan Sinyal Arus Stator ke dalam Bentuk *Intrinsic Mode Function* (IMF) Menggunakan Metode *Empirical Mode Decomposition* (EMD)

Setelah proses pencuplikan data arus stator selesai dilaksanakan, tahapan berikutnya adalah pengolahan arus yang telah diubah ke dalam bentuk digital menggunakan *listing* program EMD dalam *software* MATLAB. Penguraian EMD menerapkan penelusuran titik – titik data dari bentuk gelombang sinyal, terutama pada sisi *upper envelope* dan *lower envelope* sinyal. Dengan menggunakan interpolasi kubik spline dan perhitungan *zero crossing*, dekomposisi ke dalam bentuk IMF ini dilakukan untuk mengetahui nilai – nilai dan bentuk intrinsik sinyal arus yang ada untuk selanjutnya diproses sebagai klasifikator kondisi motor.

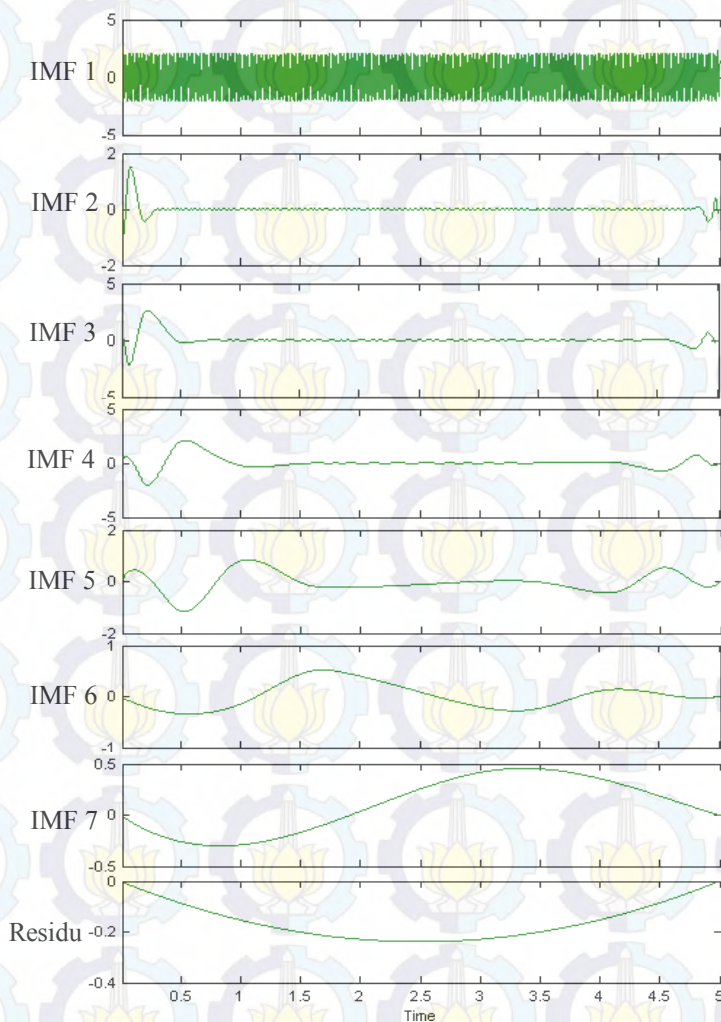
Dekomposisi EMD ini menguraikan sinyal arus utama menjadi beberapa model IMF dan residu, bentuk sinyal yang sudah tidak dapat lagi diuraikan. Mayoritas IMF untuk sinyal arus stator dalam kondisi tanpa beban berjumlah tujuh IMF dan satu residu, sedangkan pada saat dibebani, jumlah IMFnya beragam dengan angka dominan sebanyak sembilan IMF dan satu residu. Pada proses pembentukan IMF ini, sulit dibedakan secara kasat mata antar kasus, baik perbedaan sinyal pada jumlah beban yang bervariasi, maupun tingkat kerusakan rotor bar yang berbeda – beda. Pada Gambar 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, dan 4.5 digambarkan pembentukan IMF pada masing – masing tingkat kerusakan rotor bar saat motor beroperasi tanpa beban:



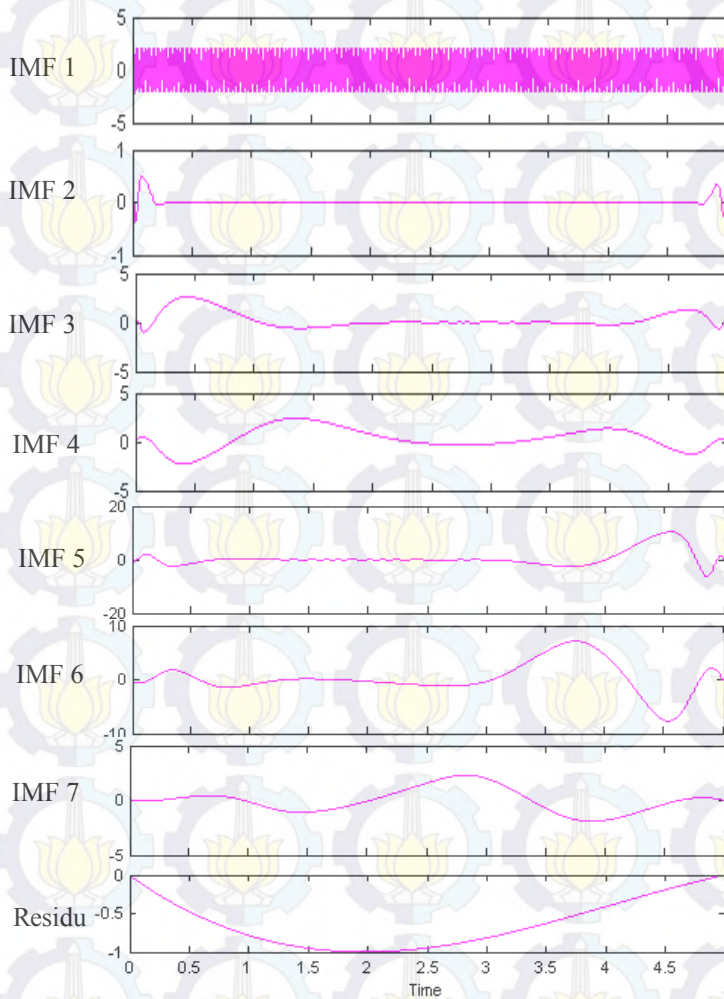
Gambar 4.1. Dekomposisi EMD ke dalam bentuk IMF pada motor kondisi normal



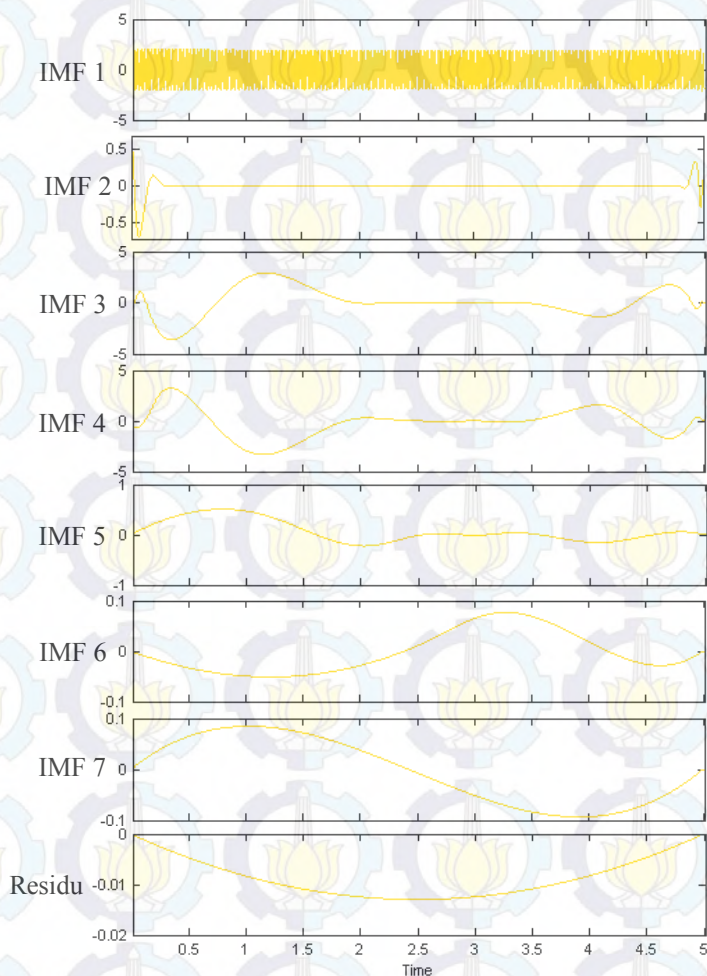
Gambar 4.2. Dekomposisi EMD ke dalam bentuk IMF pada motor dengan 1 *Broken Rotor Bar* (BRB) sedalam 3 mm.



Gambar 4.3. Dekomposisi EMD ke dalam bentuk IMF pada motor dengan 1 *Broken Rotor Bar* (BRB) sedalam 7 mm.

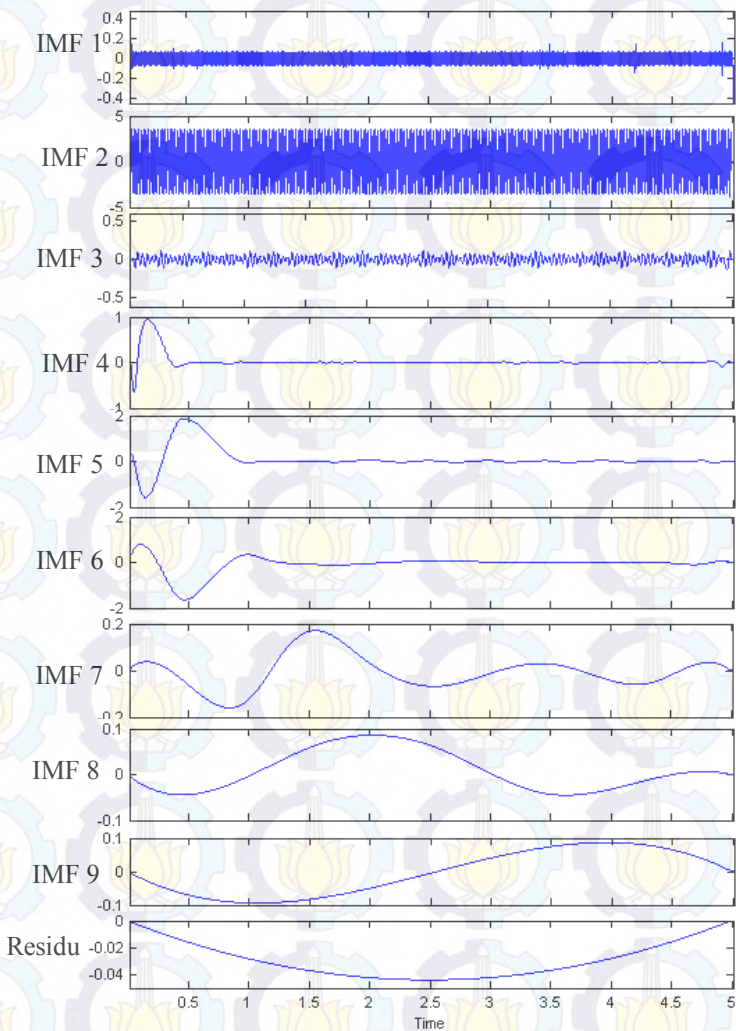


Gambar 4.4. Dekomposisi EMD ke dalam bentuk IMF pada motor dengan 3 *Broken Rotor Bar* (BRB) sedalam 3 mm.

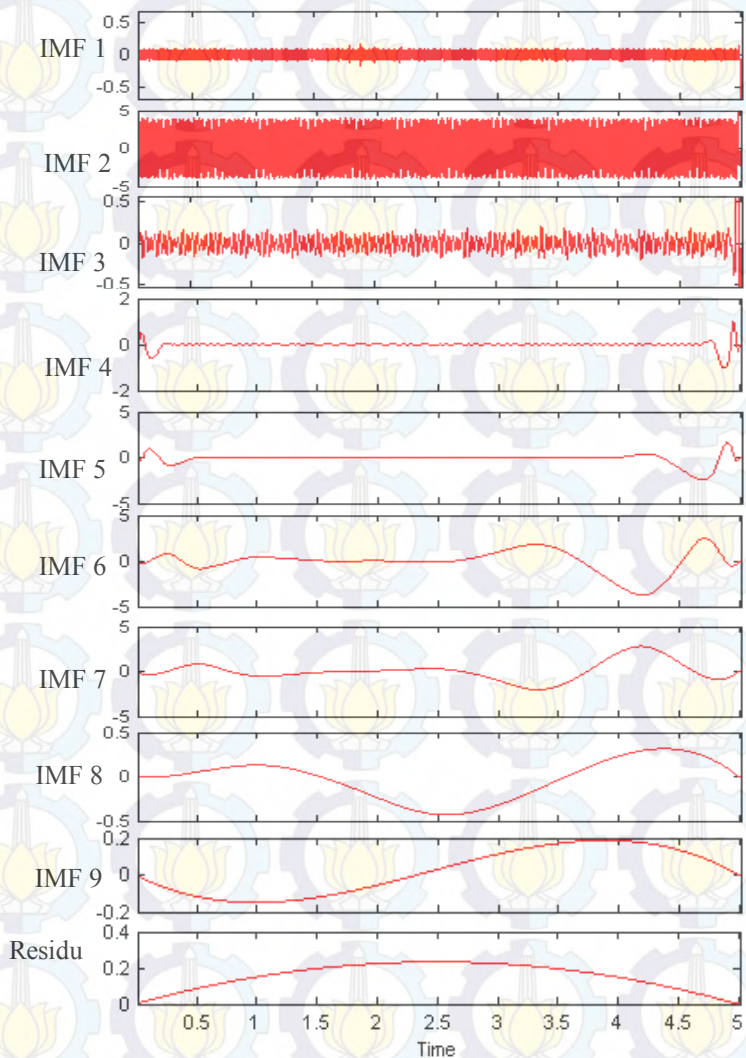


Gambar 4.5. Dekomposisi EMD ke dalam bentuk IMF pada motor dengan 3 *Broken Rotor Bar* (BRB) sedalam 7 mm.

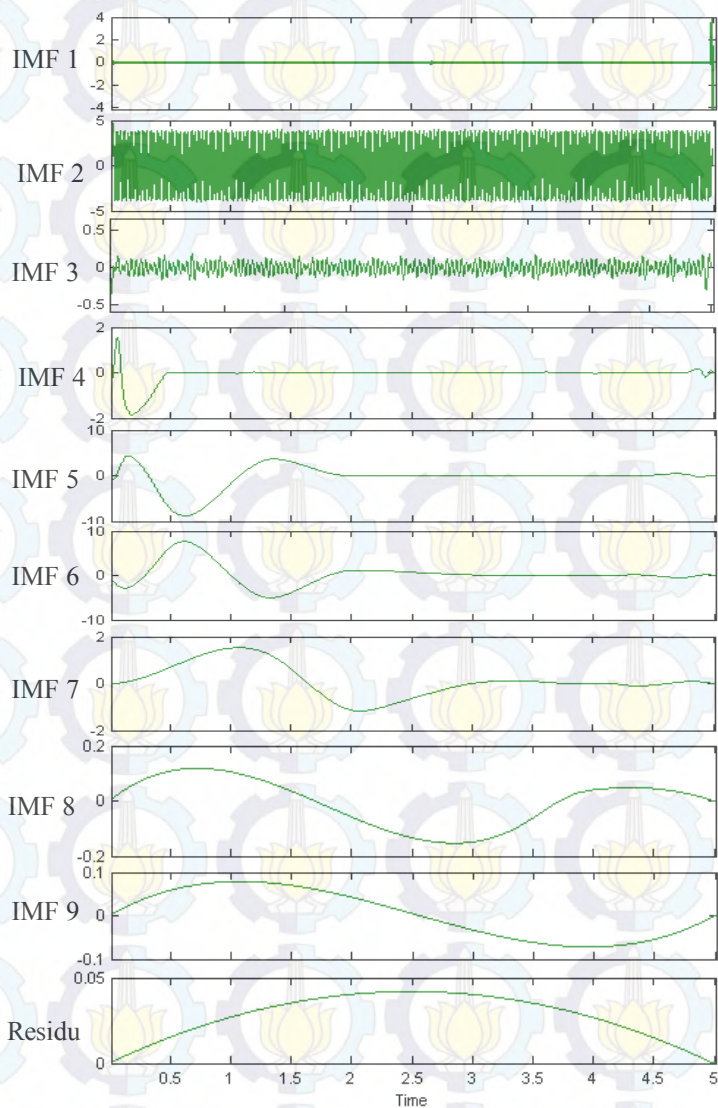
Berikutnya pada Gambar 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, dan 4.10 digambarkan pembentukan IMF pada masing – masing tingkat kerusakan rotor bar saat motor beroperasi dengan beban penuh:



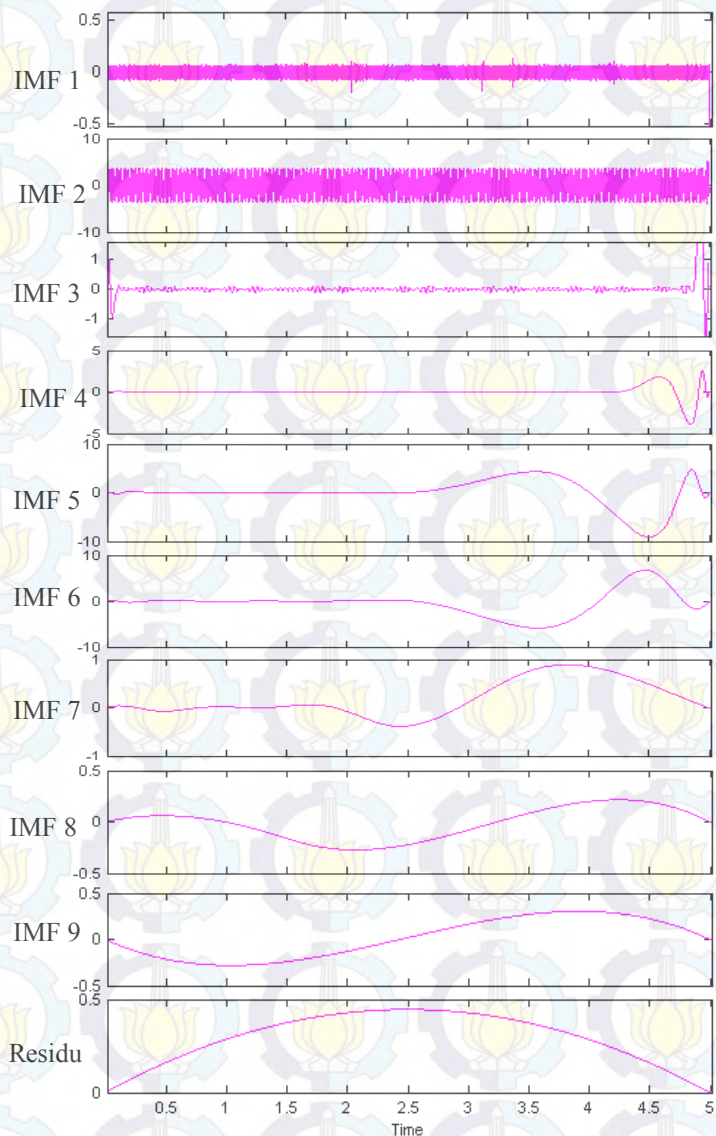
Gambar 4.6. Dekomposisi EMD ke dalam bentuk IMF pada motor dalam kondisi normal.



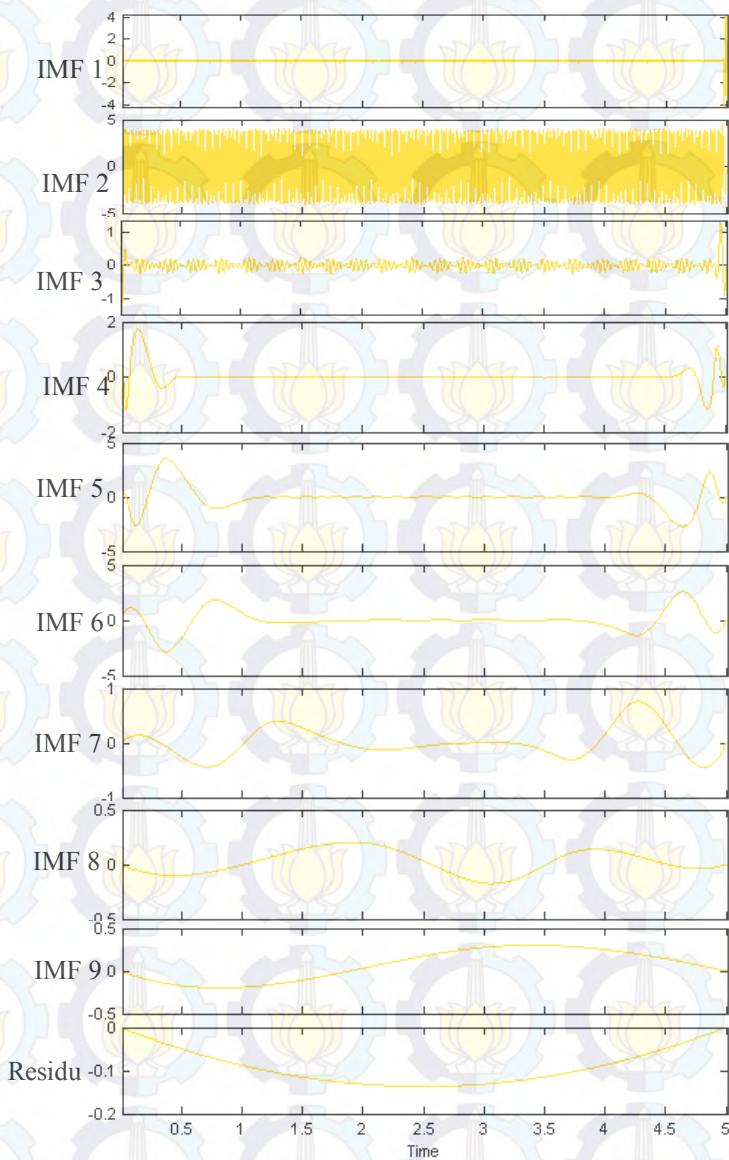
Gambar 4.7. Dekomposisi EMD ke dalam bentuk IMF pada motor dengan 1 *Broken Rotor Bar* (BRB) sedalam 3 mm.



Gambar 4.8. Dekomposisi EMD ke dalam bentuk IMF pada motor dengan 1 *Broken Rotor Bar* (BRB) sedalam 7 mm.



Gambar 4.9. Dekomposisi EMD ke dalam bentuk IMF pada motor dengan 3 *Broken Rotor Bar* (BRB) sedalam 3 mm.



Gambar 4.10. Dekomposisi EMD ke dalam bentuk IMF pada motor dengan 3 Broken Rotor Bar (BRB) sedalam 7 mm.

4.3. Pengujian Sistem Deteksi dengan Standar Deviasi dan Kurva Distribusi Normal

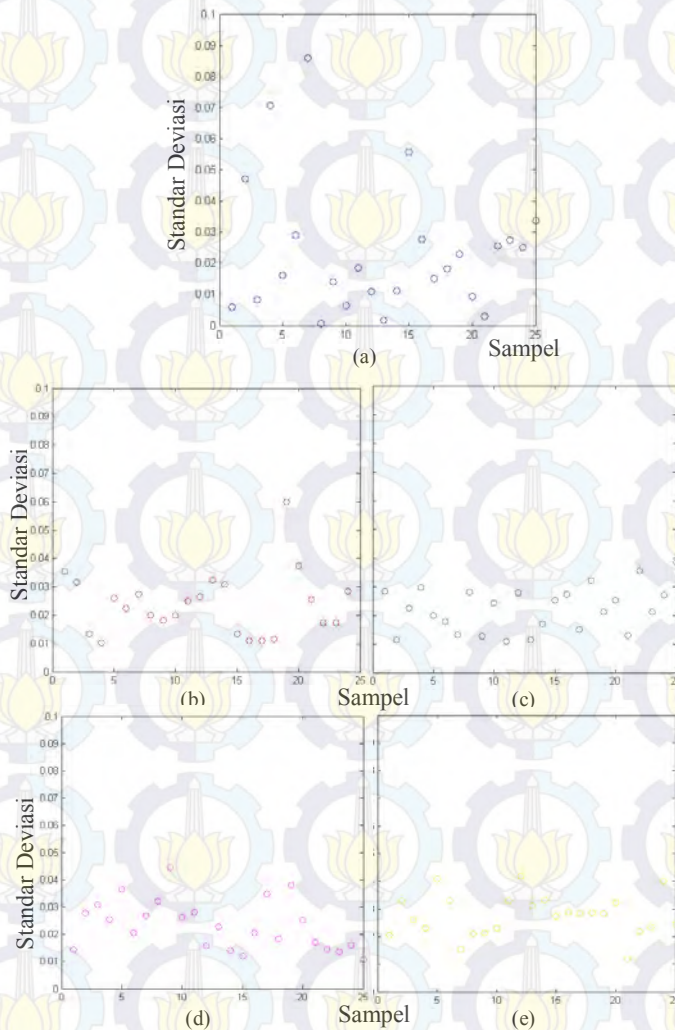
Tahap akhir dari pengujian sistem deteksi kerusakan rotor bar berbasis Analisis *Empirical Mode Decomposition* (EMD) ini yaitu pencarian standar deviasi dari nilai – nilai pada bentuk IMF terendah arus stator dari seluruh sampel yang telah diambil. Masing – masing sampel arus menghasilkan satu nilai standar deviasi yang kemudian digabungkan ke dalam satu grafik untuk dijadikan klasifikator kondisi motor. Seperti pada pembahasan sebelumnya, kondisi motor dan tingkat pembebanan cukup berpengaruh pada bentuk gelombang maupun amplitudo arus stator motor induksi. Oleh karena itu pada penjelasan subbab ini menonjolkan adanya perbedaan distribusi data berupa standar deviasi antar kondisi motor dalam tingkat pembebanan yang sama. Selain itu, pada pengolahan data secara statistika juga dikenal kurva distribusi normal untuk menunjang penjelasan dari nilai standar deviasi yang diperoleh. Pada kurva yang sering disebut dengan kurva lonceng ini, nilai kepadatan maupun persebaran data dapat diamati dengan jelas.

1.3.1. Sistem Deteksi *Broken Rotor Bar* pada Motor Berbeban 100 Watt (Tanpa Dikopel dengan Generator)

Dengan menggunakan analisis EMD, nilai standar deviasi dari motor yang tidak dikopel dengan generator, dapat diperoleh dan disajikan dalam bentuk grafik maupun kurva.

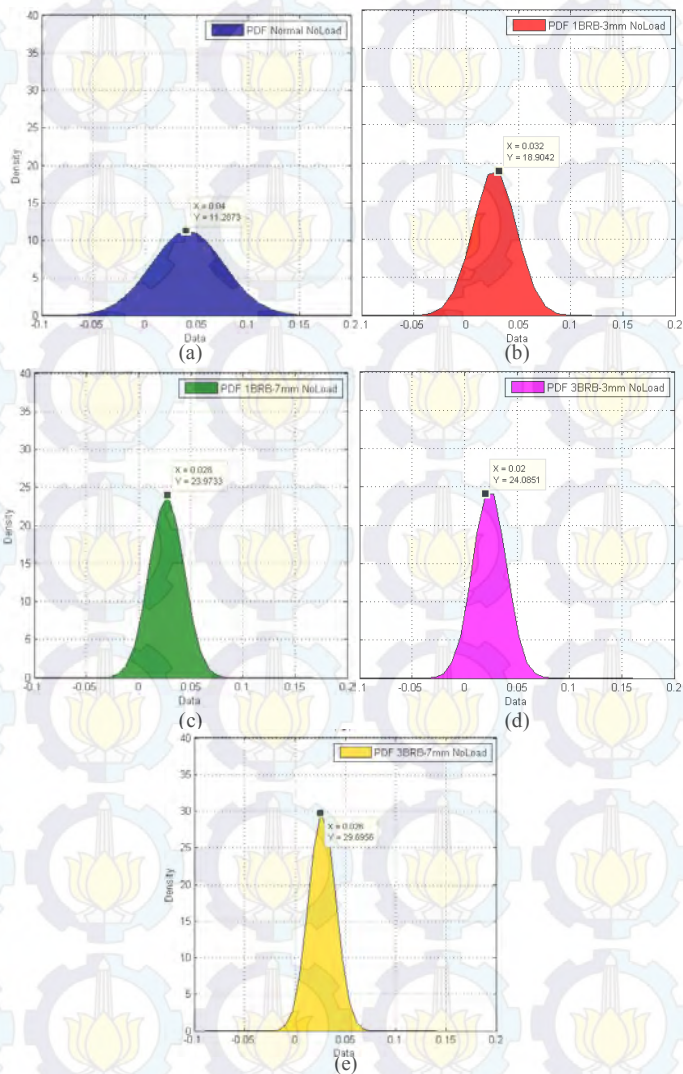
Pada Gambar 4.11 dapat diketahui bahwa kerusakan rotor bar memengaruhi persebaran nilai standar deviasi setiap sampel. Untuk motor dengan kondisi prima, nilai standar deviasi yang didapatkan tersebar luas dalam satu ruang lingkup yang telah ditentukan, pada sistem deteksi ini dimulai dari 0 sampai dengan 0,1. Sedangkan pada motor yang memiliki kerusakan rotor bar, persebaran nilai standar deviasi cenderung pada lajur yang relatif stagnan dan padat. Hasil ini merupakan pencerminan dari persebaran letak *zero crossing* yang dimiliki oleh sinyal arus stator terdekomposisi. Terbentuknya persebaran nilai kepadatan dari sinyal arus stator motor dengan *broken rotor bar* yang relatif tetap dan padat disebabkan oleh adanya pengaruh harmonisa yang berupa distorsi periodik terhadap sinyal utama.

Selain pada grafik tersebut, persebaran nilai standar deviasi dapat digambarkan melalui bentuk *Probability Density Function* (PDF) pada kurva distribusi normal seperti ditunjukkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4.11. Persebaran nilai standar deviasi dari motor tanpa beban dan tanpa dikopel dengan generator:

- (a) Kondisi normal
- (b) Kondisi dengan 1 BRB 3 mm
- (c) Kondisi dengan 1 BRB 7 mm
- (d) Kondisi dengan 3 BRB 3 mm
- (e) Kondisi dengan 3 BRB 7 mm



Gambar 4.12. Kurva distribusi normal dari motor tanpa beban, tanpa dikopel generator:

- (a) Kondisi normal
- (b) Kondisi dengan 1 BRB 3 mm
- (c) Kondisi dengan 1 BRB 7 mm
- (d) Kondisi dengan 3 BRB 3 mm
- (e) Kondisi dengan 3 BRB 7 mm

Pada Gambar 4.12 dapat diketahui bahwa adanya perbedaan persebaran standar deviasi antar kondisi motor. Pada motor dengan kondisi normal, sesuai dengan grafik standar deviasi untuk kondisi yang sama pada Gambar 4.11, memiliki kepadatan di nilai – nilai yang sama. Perbedaan utama dari kasus normal dengan BRB adalah pada kepadatan (*density*) dari masing – masing kurva. Motor yang memiliki kerusakan pada rotor bar-nya cenderung memiliki bentuk kurva yang curam, sedangkan pada motor sehat memiliki tingkat kecuraman yang rendah atau landai.

Besar nilai kepadatan atau rata – rata standar deviasi dari berbagai kondisi motor pada saat tanpa beban, yang digambarkan dalam bentuk PDF oleh kurva distribusi normal dapat dijelaskan melalui Tabel 4.3 berikut.

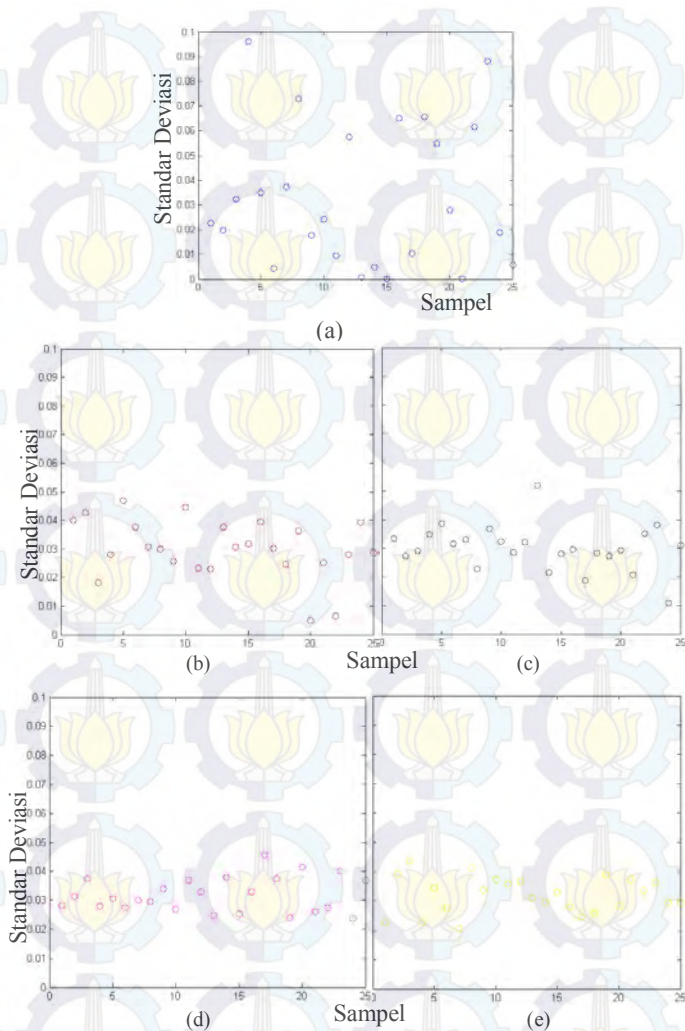
Tabel 0.3. Nilai kepadatan rata – rata standar deviasi pada permodelan PDF pada motor berbeban total 100 Watt atau tanpa dikopel dengan generator

Kondisi Motor	Nilai Koordinat Puncak PDF	
	Nilai rata-rata (x)	<i>Density</i> (y)
Normal	0.04	11.2873
1 BRB 3 mm	0.032	18.9042
1 BRB 7 mm	0.028	23.9733
3 BRB 3 mm	0.02	24.0851
3 BRB 7 mm	0.026	29.6956

Pada Tabel 4.3 di atas menunjukkan adanya kenaikan tingkat kepadatan (*density*) dari masing – masing kondisi motor. Pada motor dengan rotor bar yang rusak memiliki nilai kepadatan standar deviasi yang tinggi hingga kurang lebih sebesar dua kali dari nilai kepadatan normal.

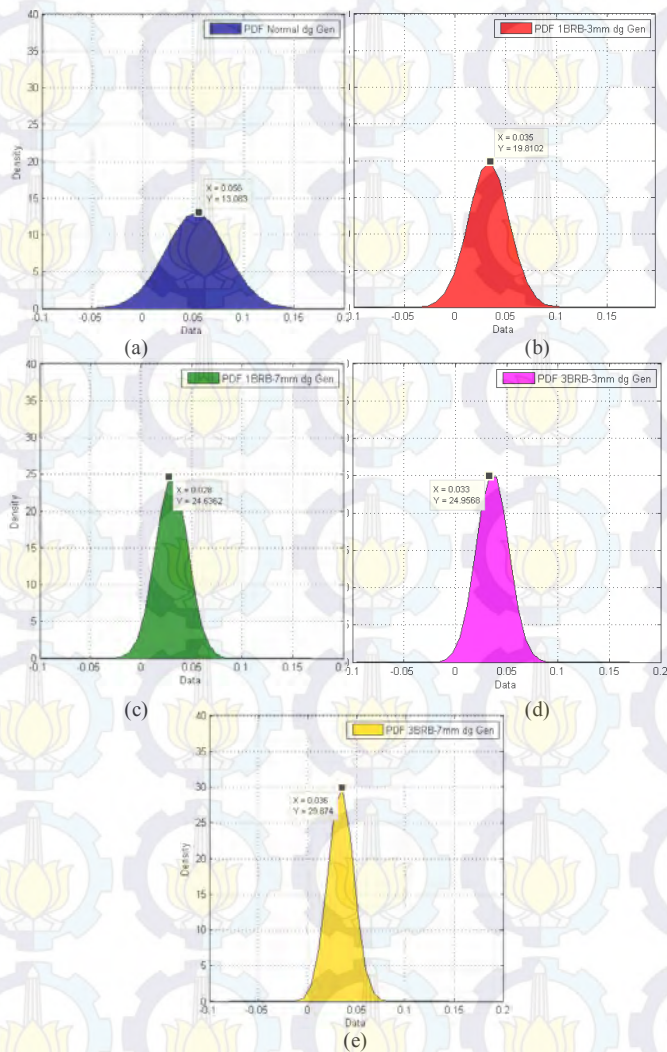
1.3.2. Sistem Deteksi *Broken Rotor Bar* pada Motor Berbeban 900 Watt (Telah Dikopel dengan Generator)

Hasil pengujian sistem deteksi kerusakan rotor bar dengan variasi pembebanan tidak memiliki perbedaan yang signifikan terhadap grafik standar deviasi maupun kurva distribusi normal.



Gambar 4.13. Persebaran nilai standar deviasi dari motor tanpa beban dan telah dikopel dengan generator:

- (a) Kondisi normal
- (b) Kondisi dengan 1 BRB 3 mm
- (c) Kondisi dengan 1 BRB 7 mm
- (d) Kondisi dengan 3 BRB 3 mm
- (e) Kondisi dengan 3 BRB 7 mm



Gambar 4.14. Kurva distribusi normal dari motor tanpa beban dan telah dikopel dengan generator:

- (a) Kondisi normal
- (b) Kondisi dengan 1 BRB 3 mm
- (c) Kondisi dengan 1 BRB 7 mm
- (d) Kondisi dengan 3 BRB 3 mm
- (e) Kondisi dengan 3 BRB 7 mm

Besar nilai kepadatan atau rata – rata standar deviasi dari berbagai kondisi motor pada saat tanpa beban lampu namun telah dikopel dengan generator, yang digambarkan dalam bentuk PDF oleh kurva distribusi normal dapat dijelaskan melalui Tabel 4.4 berikut.

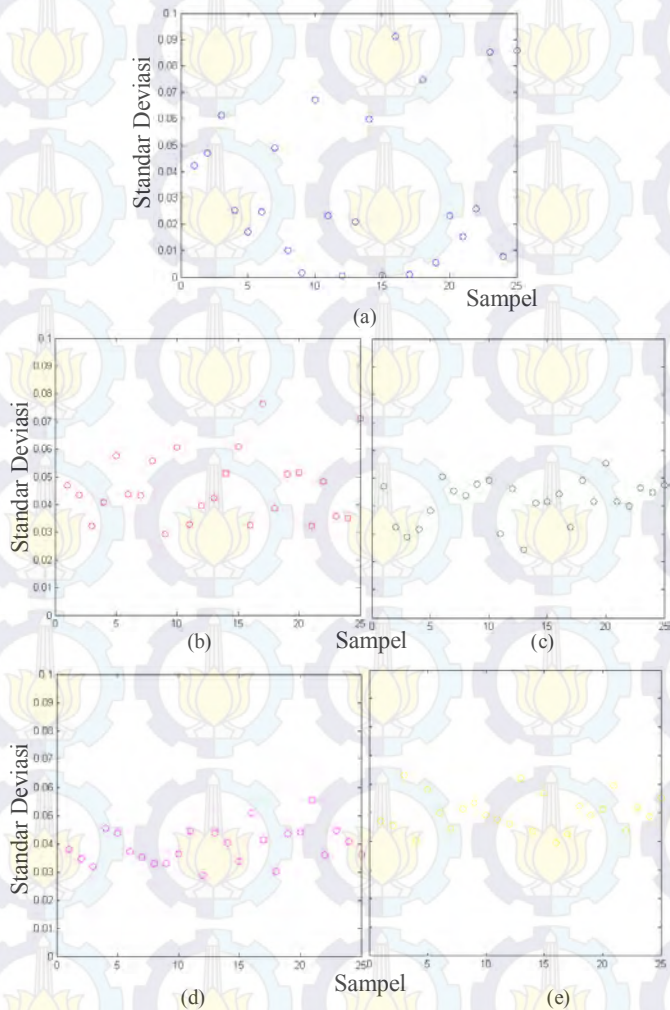
Tabel 0.4. Nilai kepadatan rata – rata standar deviasi pada model PDF pada motor berbeban total 900 Watt yang telah dikopel dengan generator

Kondisi Motor	Nilai Koordinat Puncak PDF	
	Nilai rata-rata (x)	<i>Density</i> (y)
Normal	0.056	13.083
1 BRB 3 mm	0.035	19.8102
1 BRB 7 mm	0.028	24.6362
3 BRB 3 mm	0.033	24.9568
3 BRB 7 mm	0.036	29.874

1.3.3. Sistem Deteksi *Broken Rotor Bar* pada Motor Berbeban 1.100 Watt atau 300 Watt Bohlam

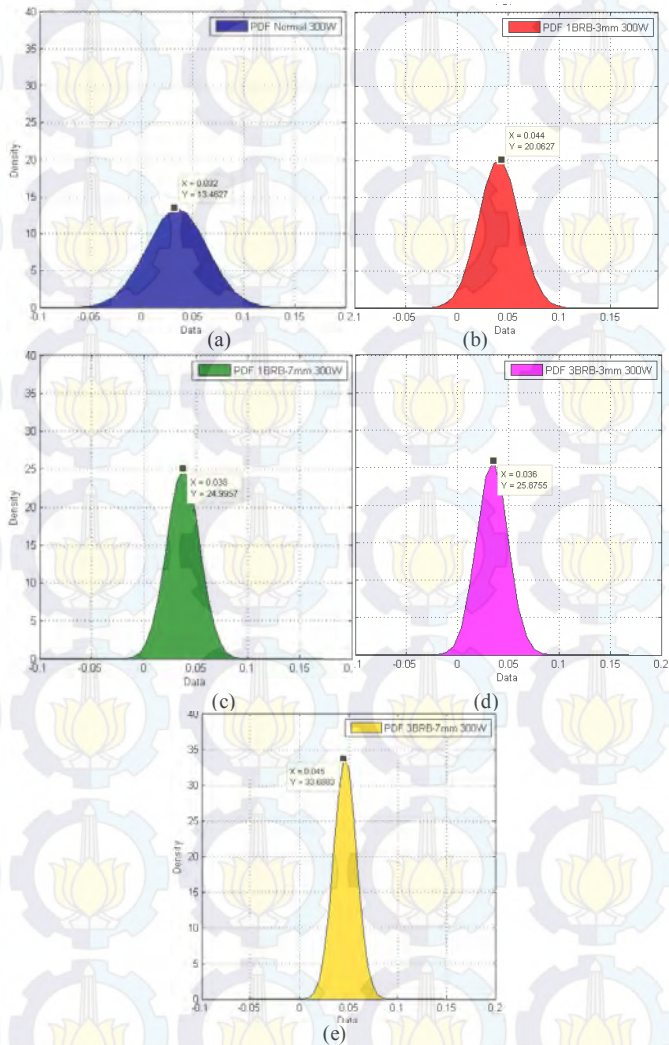
Pengujian sistem deteksi pada motor dengan dibebani total sebesar 1.100 Watt atau dikopel dengan generator yang menyuplai beban bohlam sebanyak 3 x 100 Watt, memperlihatkan hasil yang cenderung sama. Pada grafik penyebaran standar deviasi yang dihasilkan, untuk motor dalam kondisi normal memiliki nilai standar deviasi yang berbeda – beda dan luas daerah persebarannya. Sedangkan pada motor dengan BRB mempunyai nilai standar deviasi yang cenderung sama dan sempit daerah persebarannya.

Sedangkan pada model PDF dalam kurva distribusi normal seperti pada Gambar 4.16 mencerminkan kesamaan kepadatan persebaran nilai standar deviasi dari setiap sampel antar kondisi motor yang berbeda, dengan hasil yang ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 4.15. Pada motor dengan kondisi rotor bar yang normal, persebaran nilai standar deviasi yang luas menyebabkan besar kepadatan pada kurva PDF-nya landau atau rendah. Sedangkan pada motor dengan *broken rotor bar*, akibat dari persebaran data yang sempit, maka nilai kepadatan pada kurva PDF cukup tinggi dan besar.



Gambar 4.15. Persebaran nilai standar deviasi dari motor yang dibebani total 1.100 Watt atau dengan 300 Watt bohlam:

- (a) Kondisi normal
- (b) Kondisi dengan 1 BRB 3 mm
- (c) Kondisi dengan 1 BRB 7 mm
- (d) Kondisi dengan 3 BRB 3 mm
- (e) Kondisi dengan 3 BRB 7 mm



Gambar 4.16. Kurva distribusi normal dari motor berbeban 1.100 Watt atau dengan 300 Watt bohlam:

- (a) Kondisi normal
- (b) Kondisi dengan 1 BRB 3 mm
- (c) Kondisi dengan 1 BRB 7 mm
- (d) Kondisi dengan 3 BRB 3 mm
- (e) Kondisi dengan 3 BRB 7 mm

Besar nilai kepadatan atau rata – rata standar deviasi dari berbagai kondisi motor pada saat dibebani total sebesar 1.100 Watt atau dengan 300 Watt bohlam, yang digambarkan dalam bentuk PDF oleh kurva distribusi normal dapat dijelaskan melalui Tabel 4.5 berikut.

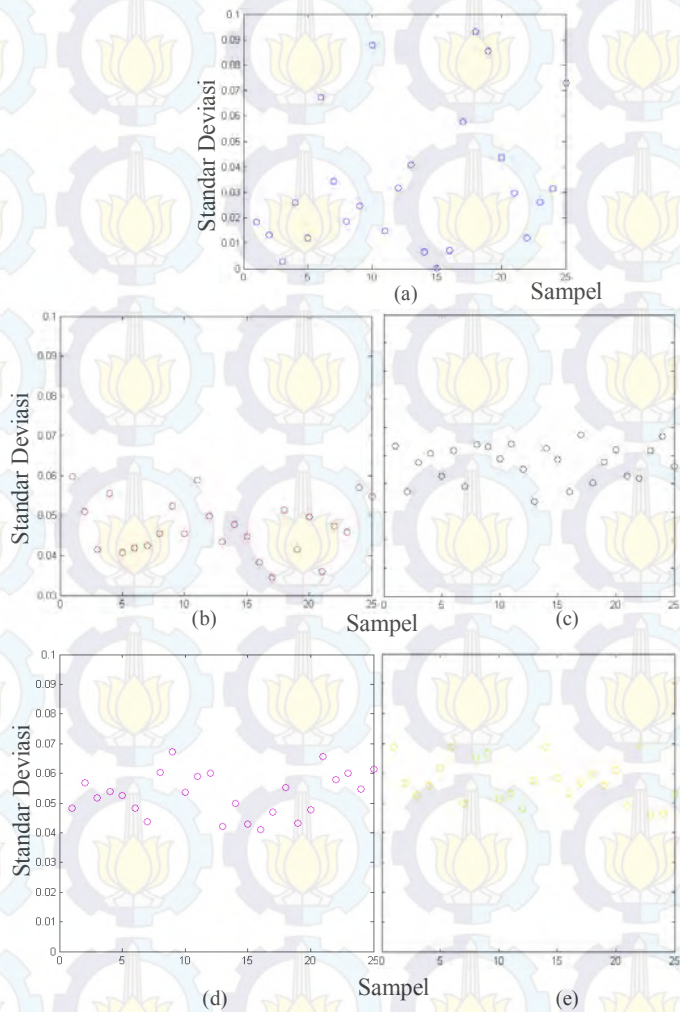
Tabel 0.5. Nilai kepadatan rata – rata standar deviasi pada model PDF pada motor berbeban total 1.100 Watt atau dengan 300 Watt bohlam

Kondisi Motor	Nilai Koordinat Puncak PDF	
	Nilai rata-rata (x)	<i>Density</i> (y)
Normal	0.032	13.4627
1 BRB 3 mm	0.044	20.0627
1 BRB 7 mm	0.038	24.9957
3 BRB 3 mm	0.036	25.8755
3 BRB 7 mm	0.045	33.6883

1.3.4. Sistem Deteksi *Broken Rotor Bar* pada Motor Berbeban 1.300 Watt atau 600 Watt Bohlam

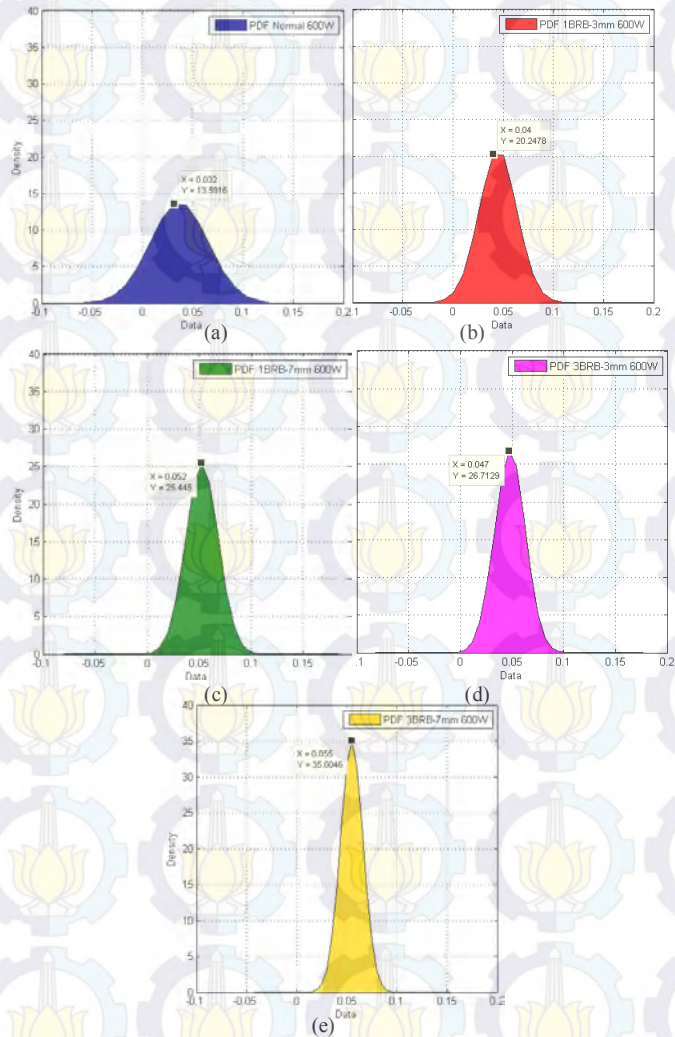
Pengujian sistem deteksi kerusakan rotor bar pada motor berbeban total 1.300 Watt atau saat motor telah terkopel dengan generator yang dibebani 6 x 100 Watt bohlam menghasilkan laporan yang sama untuk perbandingan persebaran nilai standar deviasi antara motor normal dengan motor yang memiliki BRB. Hal ini sesuai dengan yang digambarkan pada Gambar 4.17.

Pada grafik tersebut dapat diketahui bahwa timbul kenaikan nilai persebaran standar deviasi dari setiap sampel berbagai kondisi motor. Hal ini disebabkan oleh pengaruh dari besar pembebanan yang semakin meningkat sehingga memperbesar amplitudo arus stator dan nilai persebaran data yang ada. Pada bentuk PDF dalam kurva distribusi normal juga menunjukkan hal yang sama, yaitu adanya peningkatan kerapatan untuk semua kondisi motor baik motor yang masih dalam kondisi prima maupun telah mengalami kerusakan rotor bar. Meskipun tidak signifikan, peningkatan nilai akibat pengaruh pembebanan ini masih dapat diamati seperti pada Gambar 4.18.



Gambar 4.17. Persebaran nilai standar deviasi dari motor yang dibebani total 1.300 Watt atau dengan 600 Watt bohlam:

- (a) Kondisi normal
- (b) Kondisi dengan 1 BRB 3 mm
- (c) Kondisi dengan 1 BRB 7 mm
- (d) Kondisi dengan 3 BRB 3 mm
- (e) Kondisi dengan 3 BRB 7 mm



Gambar 4.18. Kurva distribusi normal dari motor berbeban 1.300 Watt atau dengan 600 Watt bohlam:

- (a) Kondisi normal
- (b) Kondisi dengan 1 BRB 3 mm
- (c) Kondisi dengan 1 BRB 7 mm
- (d) Kondisi dengan 3 BRB 3 mm
- (e) Kondisi dengan 3 BRB 7 mm

Besar nilai kepadatan atau rata – rata standar deviasi dari berbagai kondisi motor pada saat dibebani total sebesar 1.300 Watt atau dengan 600 Watt bohlam, yang digambarkan dalam bentuk PDF oleh kurva distribusi normal dapat dijelaskan melalui Tabel 4.6 berikut.

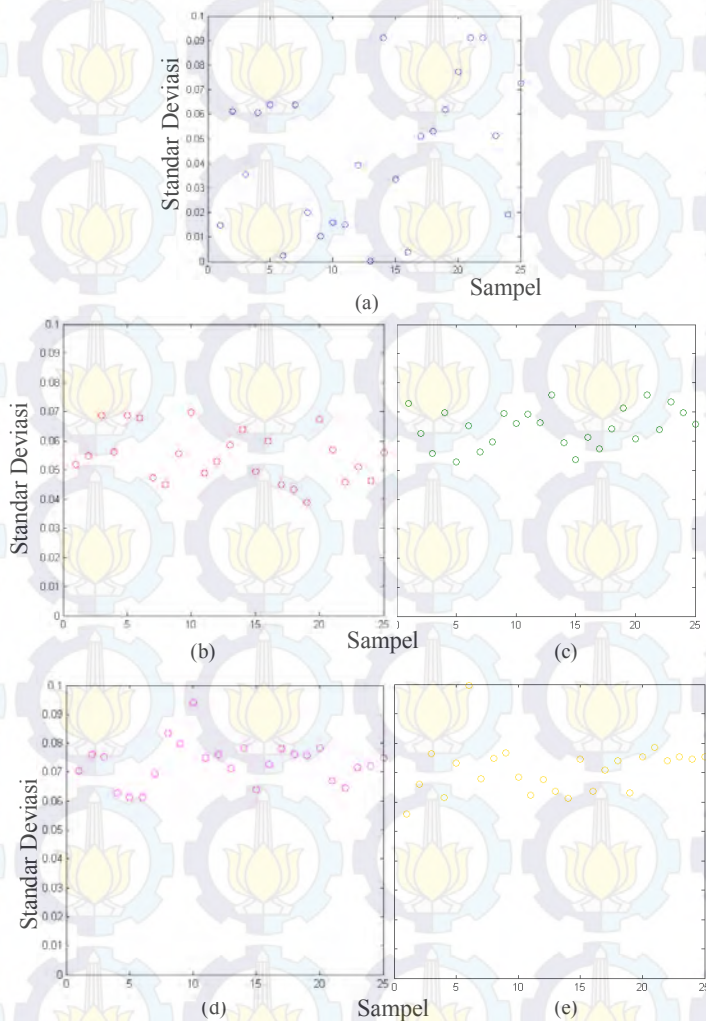
Tabel 0.6. Nilai kepadatan rata – rata standar deviasi pada model PDF pada motor berbeban total 1.300 Watt atau dengan 600 Watt bohlam

Kondisi Motor	Nilai Koordinat Puncak PDF	
	Nilai rata-rata (x)	<i>Density</i> (y)
Normal	0.032	13.5916
1 BRB 3 mm	0.04	20.2478
1 BRB 7 mm	0.052	25.445
3 BRB 3 mm	0.047	26.7129
3 BRB 7 mm	0.055	35.0046

1.3.5. Sistem Deteksi *Broken Rotor Bar* pada Motor Berbeban 1.500 Watt atau 900 Watt Bohlam

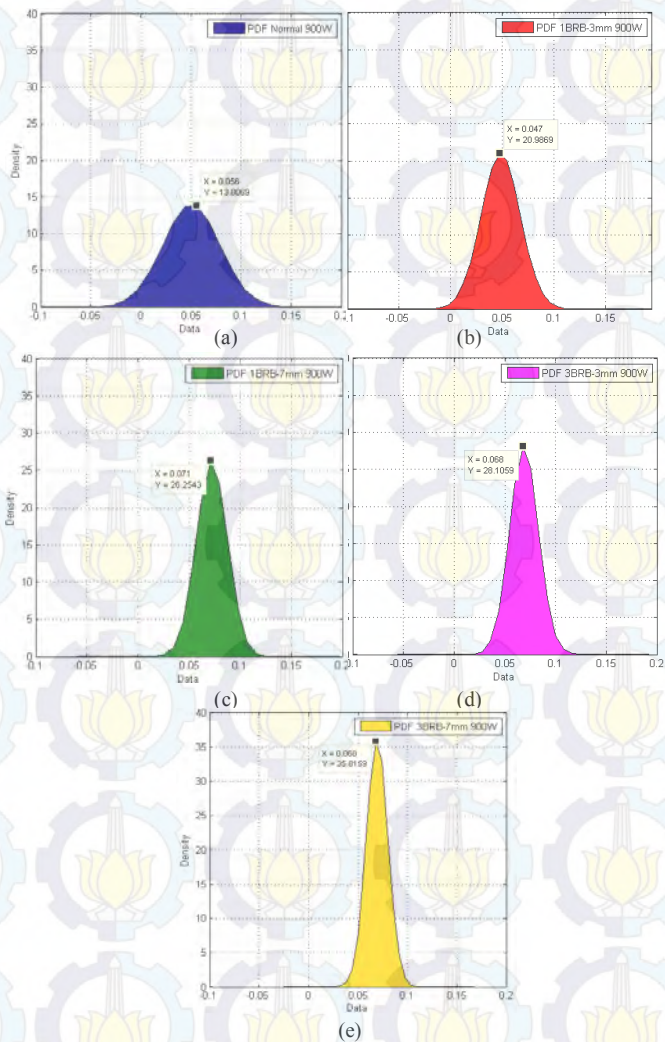
Pengujian sistem deteksi kerusakan rotor bar pada motor berbeban penuh 1.500 Watt atau saat motor telah terkopel dengan generator yang dibebani 9 x 100 Watt bohlam memperlihatkan hasil yang cenderung sama seperti pada pembebanan sebelumnya. Perbedaan yang tampak adalah dari nilai standar deviasi yang dihasilkan lebih besar dibandingkan dengan pembebanan yang lebih rendah, seperti dijelaskan pada Gambar 4.19.

Pada grafik tersebut dapat diketahui bahwa timbul kenaikan nilai persebaran standar deviasi dari setiap sampel berbagai kondisi motor. Hal ini disebabkan oleh pengaruh dari besar pembebanan yang semakin meningkat sehingga memperbesar amplitudo arus stator dan nilai persebaran data yang ada. Pada bentuk PDF dalam kurva distribusi normal juga menunjukkan hal yang sama, yaitu adanya peningkatan kerapatan untuk semua kondisi motor baik motor yang masih dalam kondisi prima maupun telah mengalami kerusakan rotor bar. Meskipun tidak signifikan, peningkatan nilai akibat pengaruh pembebanan ini masih dapat diamati seperti pada Gambar 4.20.



Gambar 4.19. Persebaran nilai standar deviasi dari motor yang dibebani penuh 1.500 Watt atau dengan 900 Watt bohlam:

- (a) Kondisi normal
- (b) Kondisi dengan 1 BRB 3 mm
- (c) Kondisi dengan 1 BRB 7 mm
- (d) Kondisi dengan 3 BRB 3 mm
- (e) Kondisi dengan 3 BRB 7 mm



Gambar 4.20. Kurva distribusi normal dari motor berbeban 1.500 Watt atau dengan 900 Watt bohlam:

- (a) Kondisi normal
- (b) Kondisi dengan 1 BRB 3 mm
- (c) Kondisi dengan 1 BRB 7 mm
- (d) Kondisi dengan 3 BRB 3 mm
- (e) Kondisi dengan 3 BRB 7 mm

Besar nilai kepadatan atau rata – rata standar deviasi dari berbagai kondisi motor pada saat dibebani total sebesar 1.500 Watt atau dengan 900 Watt bohlam, dapat dijelaskan melalui Tabel 4.7 berikut.

Tabel 0.7. Nilai kepadatan rata – rata standar deviasi pada model PDF pada motor berbeban penuh 1.500 Watt atau dengan 900 Watt bohlam

Kondisi Motor	Nilai Koordinat Puncak PDF	
	Nilai rata-rata (x)	Density (y)
Normal	0.056	13.8069
1 BRB 3 mm	0.047	20.9869
1 BRB 7 mm	0.071	26.2543
3 BRB 3 mm	0.068	28.1059
3 BRB 7 mm	0.068	35.8159

4.4. Pengaruh Pembebanan pada Arus Stator Motor Induksi

Seperti yang telah dibahas sebelumnya, adanya perbedaan tingkat pembebanan dapat memengaruhi kualitas dan bentuk gelombang dari arus stator motor induksi. Hal ini dapat dijelaskan melalui Persamaan (4.1) dan (4.2) di bawah ini.

$$P_{out} = \frac{\eta \cdot P_{in}}{100\%} \quad (4.1)$$

$$P_{in} = \sqrt{3} \cdot V_{LL} \cdot I_a \cdot \cos \alpha \quad (4.2)$$

Dengan:

P_{out} = Daya keluaran

η = Efisiensi

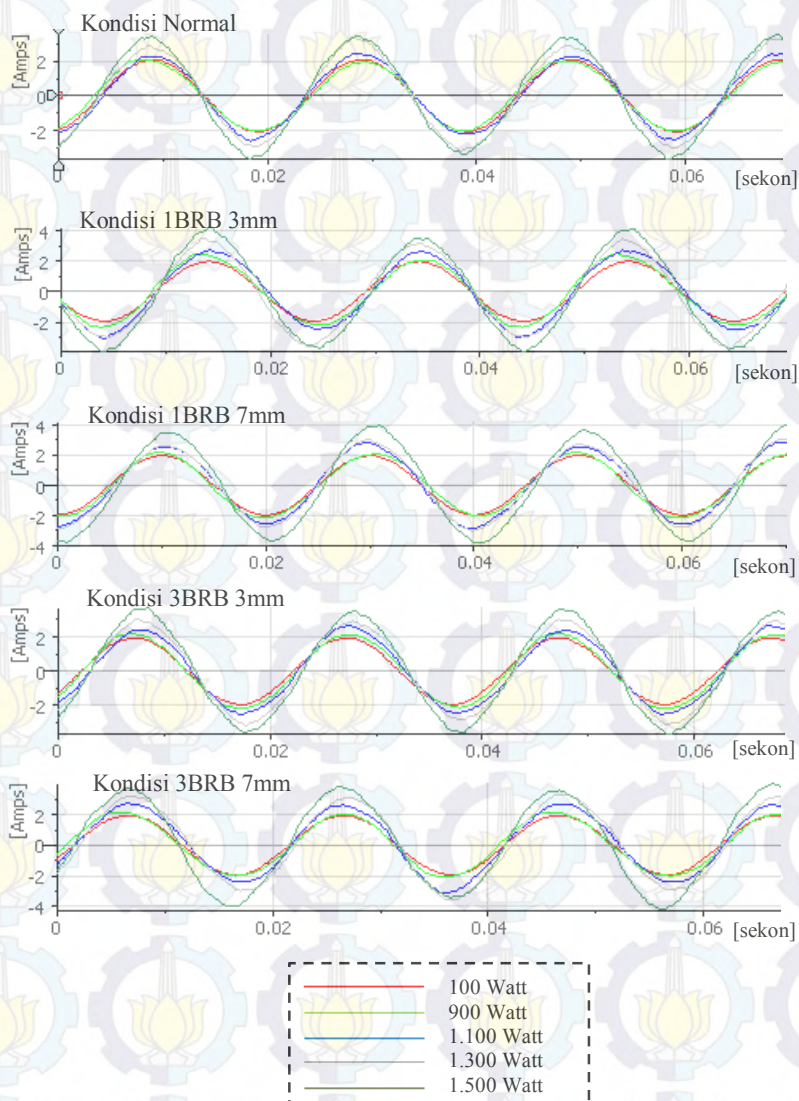
P_{in} = Daya masukan

V_{LL} = Tegangan fasa-fasa

I_a = Arus suplai

$\cos \alpha$ = Faktor daya

Besar daya keluaran untuk menyuplai beban sebanding dengan besar tegangan dan arus stator pada motor induksi. Peningkatan beban sebanding dengan tinggi daya keluaran sehingga meningkatkan kedua unsur tersebut, baik nilai tegangan maupun arus untuk menyuplainya. Namun pada kasus ini, tegangan motor dibuat stabil sehingga hal ini dapat memengaruhi besar amplitudo dari arus tersebut.



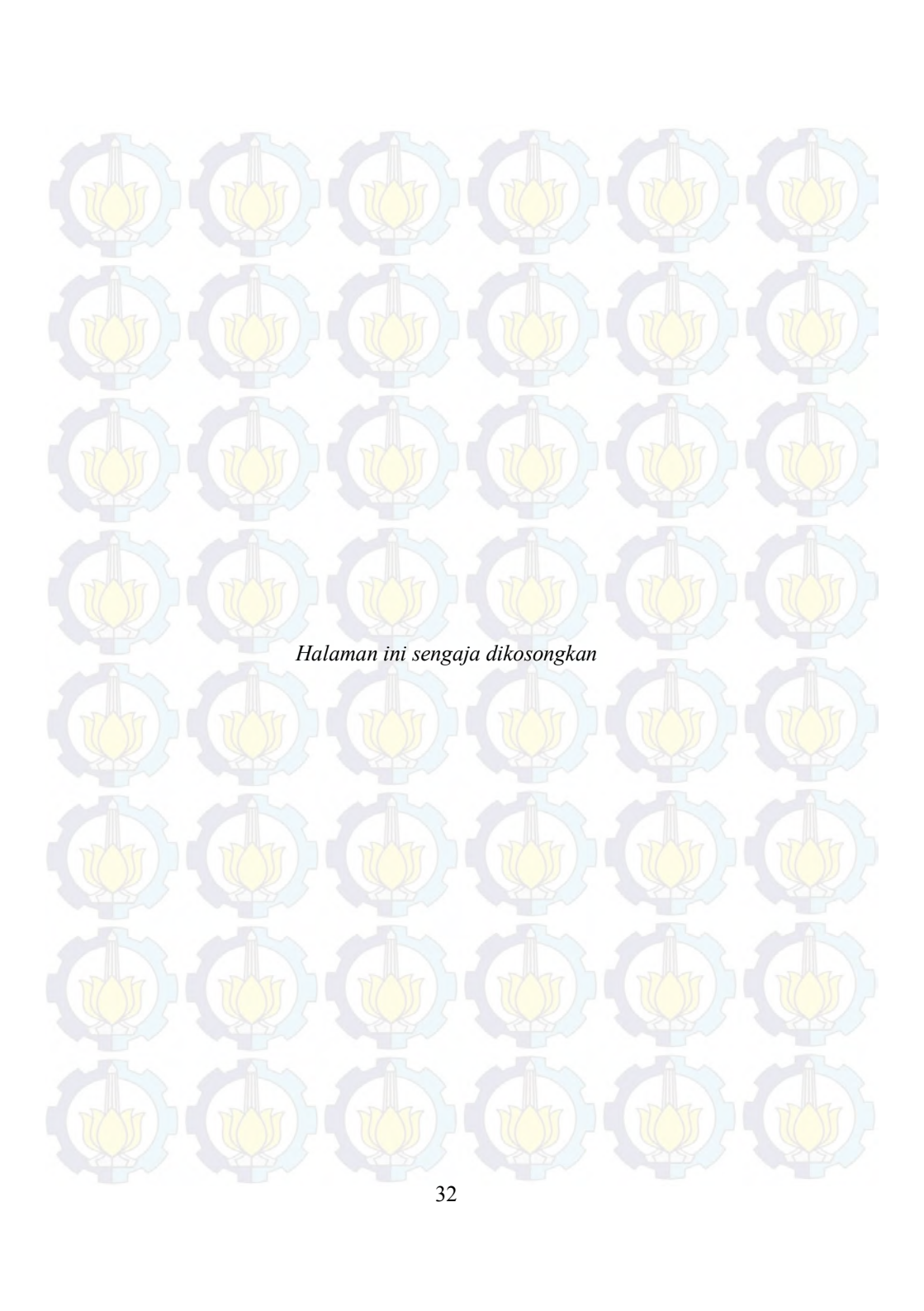
Gambar 4.21. Berbagai bentuk sinyal arus stator fasa R yang dipengaruhi oleh variasi pembebanan dan kerusakan rotor bar yang ditampilkan dalam *software* DIAdem.

Gambar 4.21 tersebut menggambarkan pengaruh dari variasi pembebanan dan kerusakan rotor bar dari motor induksi terhadap bentuk gelombang maupun kualitas daya arus stator motor induksi yang bersangkutan, yang ditampilkan melalui DIAdem yang terintegrasi dengan LabVIEW.

Sedangkan pengaruh level pembebanan pada hasil akhir analisis ini dalam grafik persebaran standar deviasi dan kurva distribusi normal, dapat dijelaskan melalui Tabel 4.8 berikut:

Tabel 0.8. Nilai kepadatan rata – rata standar deviasi dalam kurva distribusi normal dengan variasi pembebanan.

Nilai Koordinat Puncak PDF		Normal	1 BRB 3 mm	1 BRB 7 mm	3 BRB 3 mm	3 BRB 7 mm
Nilai rata-rata (x)	100W	0.04	0.032	0.028	0.02	0.026
	900W	0.056	0.035	0.028	0.033	0.036
	1.100W	0.032	0.044	0.038	0.036	0.045
	1.300W	0.032	0.04	0.052	0.047	0.055
	1.500W	0.056	0.047	0.071	0.068	0.068
Density (y)	100W	11.28	18.90	23.97	24.08	29.69
	900W	13.08	19.81	24.63	24.95	29.87
	1.100W	13.46	20.06	24.99	25.87	33.68
	1.300W	13.59	20.24	25.44	26.71	35.00
	1.500W	13.80	20.98	26.25	28.10	35.81



Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5 PENUTUP

5.1. Kesimpulan


Berdasarkan hasil yang telah didapatkan melalui proses pengujian dan analisis data mengenai sistem deteksi kerusakan rotor bar motor induksi menggunakan Metode Standar Deviasi berbasis Analisis *Empirical Mode Decomposition* (EMD) yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Kerusakan rotor bar pada motor induksi sangkar bajing menyebabkan munculnya frekuensi harmonisa yang dapat mengganggu bentuk dan kualitas dari gelombang sinyal arus stator motor.
2. Sistem deteksi kerusakan rotor bar berbasis analisis EMD dapat menggunakan persebaran nilai standar deviasi sebagai klasifikator kondisi motor. Pada motor dengan kondisi prima atau normal, persebaran nilai standar deviasi besar dan luas cakupannya, sedangkan nilai standar deviasi untuk motor yang mengalami kerusakan rotor bar memiliki nilai yang cenderung stagnan dan sempit lingkungnya. Persebaran nilai standar deviasi ini dapat juga digambarkan dalam mode *Probability Density Function* (PDF) melalui kurva distribusi normal untuk diamati jumlah rata – rata maupun kerapatan dari seluruh standar deviasi sampel.
3. Variasi pembebanan tidak memengaruhi pendeteksian secara signifikan, namun dapat meningkatkan amplitudo arus stator motor.

5.2. Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pengaplikasian sistem deteksi kerusakan rotor bar dengan menggunakan Metode Standar Deviasi berbasis Analisis EMD ini merupakan sistem yang aplikatif dan dapat diterapkan untuk jenis kerusakan komponen lain seperti pada bearing, dan juga dapat digunakan dalam kondisi arus transien.

- 
2. Penggunaan metode ini akan lebih sempurna dan akurat untuk motor dengan kapasitas yang lebih besar dan dalam frekuensi sampling yang lebih tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Valles-Novo, J. Rangel-Magdaleno, J. Ramirez-Cortes, H. Peregrina-Barreto, R. Morales-Carporal, "Empirical Mode Decomposition Analysis for Broken-Bar Detection on Squirrel Cage Induction Motors", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Desember, 2014.
- [2] R. Valles-Novo, J. Rangel-Magdaleno, J. Ramirez-Cortes, H. Peregrina-Barreto, R. Morales-Carporal, "Broken Bar Detection on Squirrel Cage Induction Motors with MCSA and EMD", IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, Mei, 2014.
- [3] Technical Data, "**Manual Guide of Induction Motors**", Popular Pump Industries, 2015.
- [4] Swasetyasakti, Rifaldy, "*Deteksi Kerusakan Rotor Bar Motor Induksi dengan Menggunakan Analisis Arus Keluaran Inverter berbasis Wavelet*", Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Surabaya, Juli, 2013.
- [5] Chapman, Stephen J., "*Electric Machinery Fundamentals Fourth Edition*", McGraw-Hill, New York, 2005.
- [6] Mo Chen, Danilo P. Mandic, Preben Kidmose, Michael Ungstrup "Qualitative Assesment of Intrinsic Mode Functions of Empirical Mode Decomposition" IEEE-ICASSP, 2008.
- [7] Swasetyasakti, Rifaldy, "Kerusakan Rotor Bar Motor Induksi" <URL:<http://swastyack.blogspot.co.id/2013/11/kerusakan-rotor-bar-motor-induksi.html>>, November, 2013.
- [8] Neelam Mehala, Ratna Dahiya, "Motor Current Signature Analysis and Its Application in Induction Motor Fault Diagnosis", International Journal of Systems Applications, Engineering & Development, Volume 2 Issue 1, India, 2007.
- [9] Kemp, Jeremy, "A Plot of Normal Distribution" <URL:https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_deviation#/media/File:Standard_deviation_diagram.svg>, Februari, 2005.
- [10] Manual Guide, "**NI cDAQ-9171 Overview and Specifications**", National Instrument Corporation, 2012.
- [11] Manual Guide, "**NI9246 Getting Started Guide**", National Instrument Corporation, 2015.
- [12] N. E. Huang, Zheng Shen, Steven R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Qunan Zheng, Nai-Chyuan Yen, C. C. Tung, H. H. Liu, "The

Empirical Mode Decomposition and The Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis”, The Royal Society, Proc. R. Soc. Lond. A 454, 903-995, Inggris, 1998.

- [13] Chang Gao, Haifeng Li, Lin Ma, “An Intrinsic Mode Function Basis Dictionary for Auditory Signal Processing”, IEEE-ICALIP, 2014.
- [14] Jinjiang Wang, Robert X. Gao, Ruqiang Yan, “Broken-Rotor Bar Diagnosis for Induction Motors”, 9th International Conference on Damage Assesment of Structures, Journal of Physics: Conference Series 305, 2011.
- [15] Jawad Faiz, Vahid Ghorbanian, Bashir Mahdi Ebrahimi, “EMD-Based Alaysis of Industrial Induction Motors with Broken Rotor Bars for Identification of Operating Point at Different Supply Modes”, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 10, No. 2, Mei, 2014.
- [16] Arturo Garcia-Perez, Oscar Ibarra-Manzano, Rene J. Romero-Troncoso, “Analysis of Partially Broken Rotor Bar by Using A Novel Empirical Mode Decomposition Method”, IEEE 978-1-4799-4032-5, 2014.
- [17] Jose de Jesus Rangel-Magdaleno, Hayde Peregrina-Barreto, Juan Manuel Ramirez-Cortes, Pilar Gomez-Gil, Roberto Morales-Caporal, “FPGA-Based Broken Bars Detection on Induction Motors Under Different Load Using Motor Current Signature Analysis and Mathematical Morphology”, IEEE Transacations on Instrumentation and Measurement, Vol. 63, No. 5, Mei, 2014.
- [18] Gabriel Rilling, Patrick Flandrin, Paulo Goncalves, “On Empirical Mode Decomposition and Its Algorithms”, Project IS2, INRIA Rhone-Alpes, Perancis, 2003.
- [19] Douglas Baptista de Souza, Jocelyn Chanussot, Anne-Catherine Favre, “On Selecting Relevant Intrinsic Mode Functions in Empirical Mode Decomposition: An Energy-Based Approach”, IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2014.
- [20] Steven C. Chapra, Raymond P. Canale, “*Numerical Methods for Engineer*”, McGraw-Hill, New York, 2010.
- [21] Xiaofeng Yue, Haihe Shao, “Fault Diagnosis of Rolling Elemnt Bearing Based on Improved Ensemble Empirical Mode Decomposition”, 7th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, IEEE, 2015.

LAMPIRAN

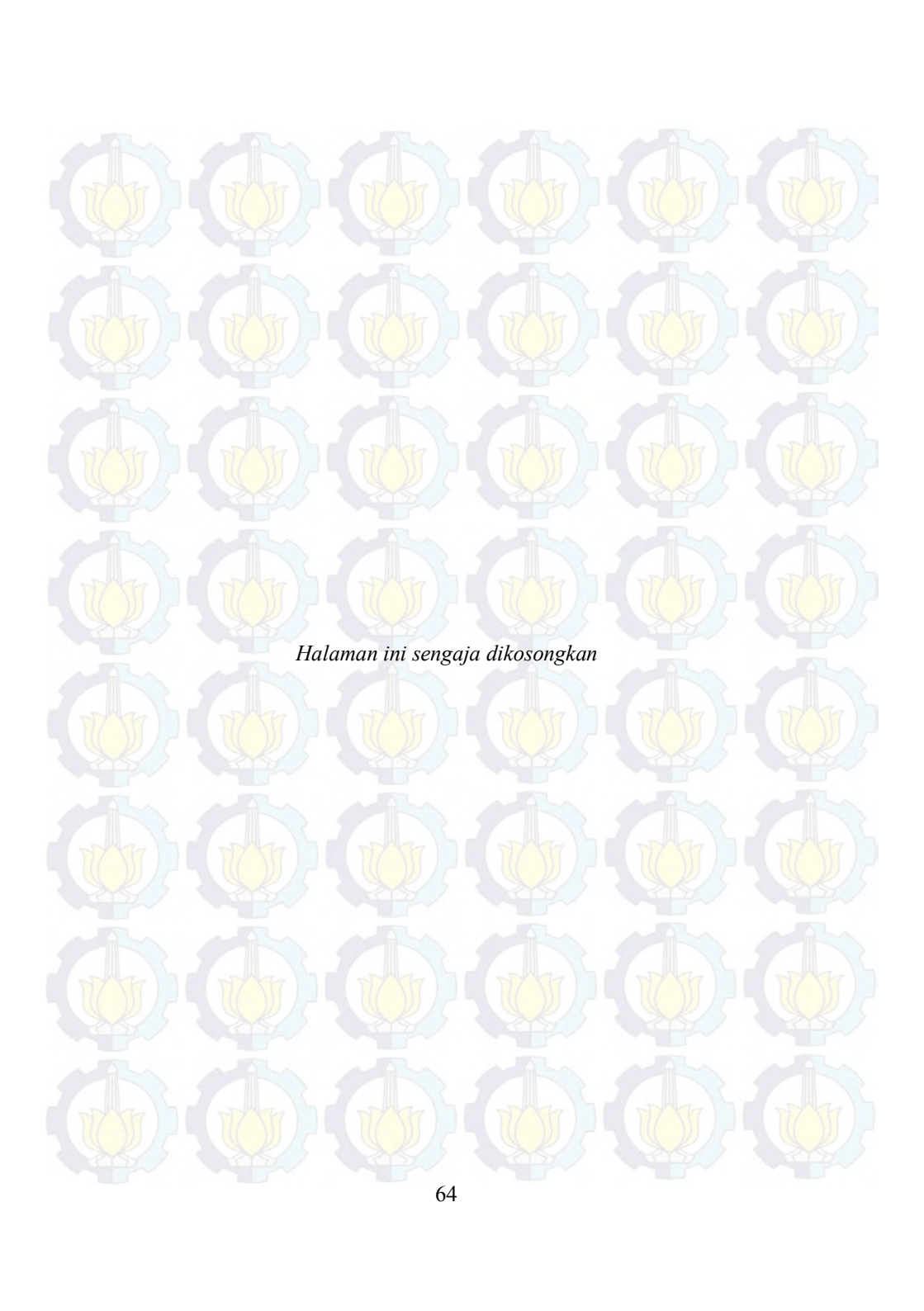
Lampiran 1

Listing PLOT IMF

```
function plot_hht(x,Ts)
% Plot the HHT.
% plot_hht(x,Ts)
%
% :: Syntax
%   The array x is the input signal and Ts is
the sampling period.
% Func : emd

% Get HHT.
Ts=1/5000;
imf = emd(x);
for k = 1:length(imf)
    b(k) = sum(imf{k}.*imf{k});
    th    = angle(hilbert(imf{k}));
    d{k} = diff(th)/Ts/(2*pi);
end
[u,v] = sort(-b);
b      = 1-b/max(b);

% Set IMF plots.
M = length(imf);
N = length(x);
c = linspace(0, (N-1)*Ts, N);
for k1 = 0:4:M-1
    figure
    for k2 = 1:min(4,M-k1), subplot(4,1,k2),
plot(c,imf{k1+k2});
set(gca,'FontSize',8,'XLim',[0 c(end)]); end
xlabel('Time');
end
```



Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran 2

Listing EMD

```
function imf = emd(x)
% Empirical Mode Decomposition (Hilbert-Huang
Transform)
% imf = emd(x)
% Func : findpeaks

x = transpose(x(:));
imf = []
figure(1)
hold on
sdmat=[];
while ~ismonotonic(x)
    x1 = x;
    sd = Inf;

    while (sd > 0.1) | ~isimf(x1)
        s1 = getspline(x1);
        s2 = -getspline(-x1);
        x2 = x1-(s1+s2)/2;

        sd = sum((x1-x2).^2)/sum(x1.^2)
        sdmat=[sdmat,sd];
        %figure (1)
        %plot(sd,'b0')
        x1 = x2;
    end

    imf{end+1} = x1;
    x = x-x1;
end
sdmat
hold off
figure
plot (sdmat,'bo')
[f,xi] = ksdensity(sdmat);
```

```
figure
area(xi,f);
title('PDF')
imf{end+1} = x;
```

```
% FUNCTIONS
```

```
function u = ismonotonic(x)
```

```
u1 = length(findpeaks(x))*length(findpeaks(-x));
if u1 > 0, u = 0;
else, u = 1; end
```

```
function u = isimf(x)
```

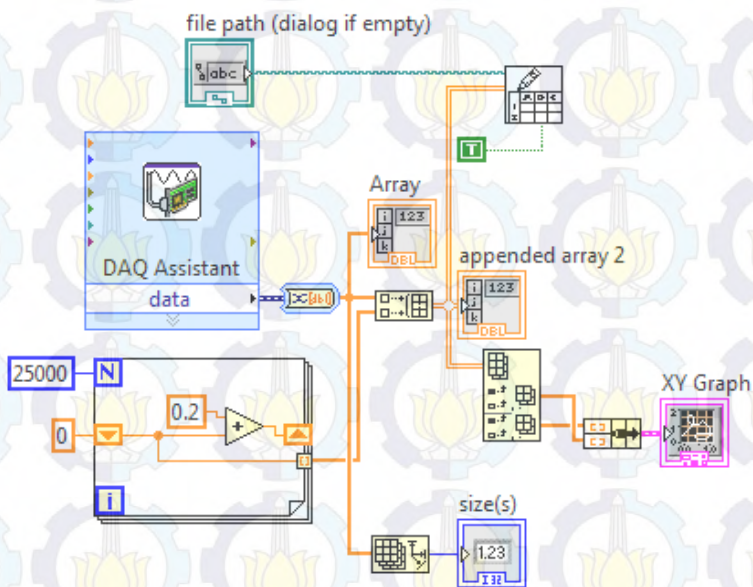
```
N = length(x);
u1 = sum(x(1:N-1).*x(2:N) < 0);
u2 = length(findpeaks(x))+length(findpeaks(-x));
if abs(u1-u2) > 1, u = 0;
else, u = 1; end
```

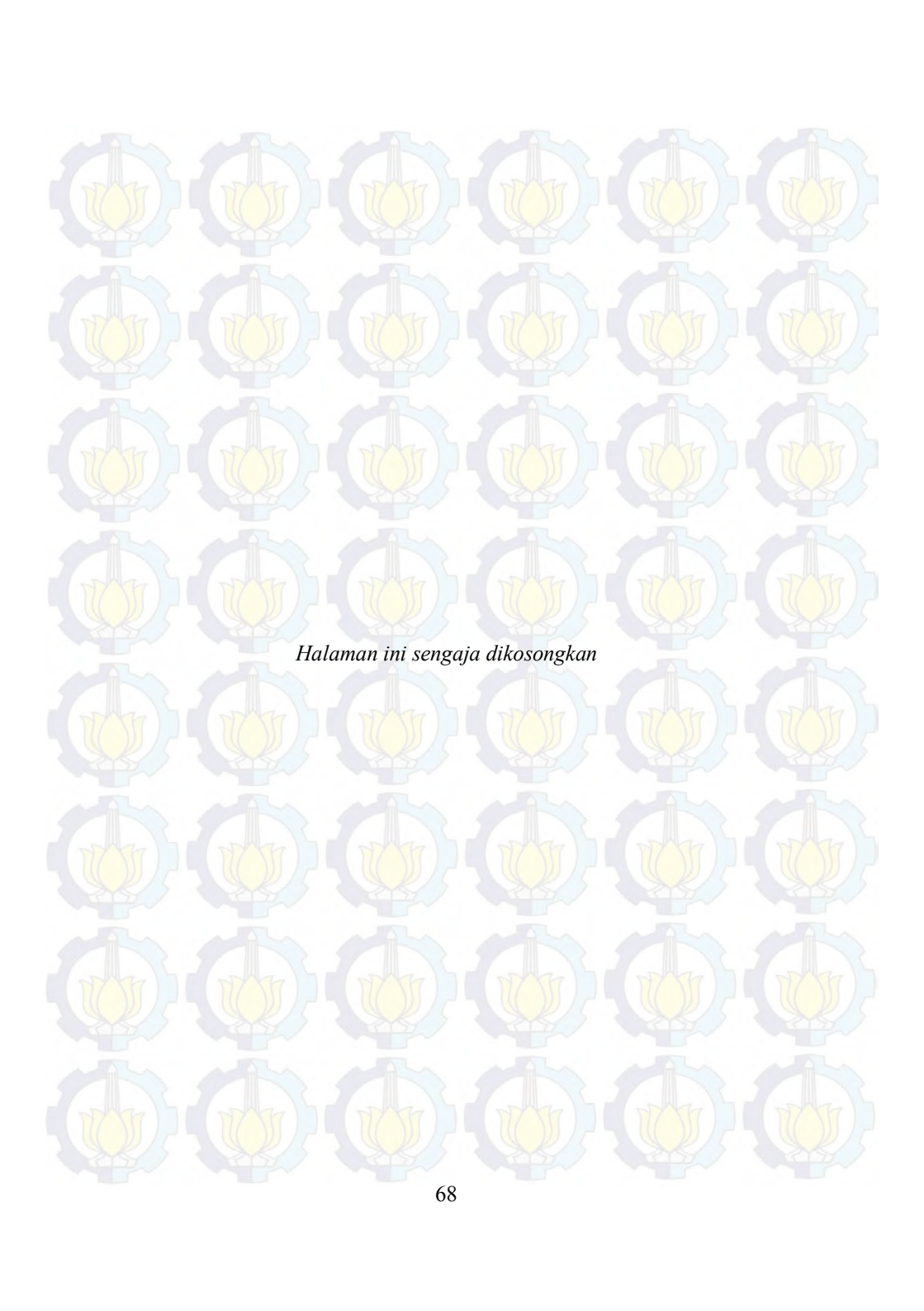
```
function s = getspline(x)
```

```
N = length(x);
p = findpeaks(x);
s = spline([0 p N+1],[0 x(p) 0],1:N);
```

Lampiran 3

Diagram Blok Pensamplangan Data





Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kediri pada tanggal 2 September 1994 dengan nama lengkap Nabila Ardhana Iswari Azisputri, dari orang tua Ir. Zainudin Azis dan Sri Ratna Novianingsih. Penulis menjalani masa kecilnya di Kediri hingga kelas 3 sekolah dasar di SDN 2 Lirboyo, dan melanjutkan masa remajanya di Cileungsi, Kabupaten Bogor. Penulis menamatkan pendidikan dasar di SDN Cileungsi 6 (tahun 2006), pendidikan menengah di SMPN 1 Cileungsi (tahun 2009) dan SMAN 1 Cileungsi (tahun 2012). Saat ini penulis berusia 21 tahun dan sedang menempuh studi tingkat strata 1 di Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga sebagai fokus studinya. Selama kuliah penulis aktif dalam berbagai kegiatan akademis maupun non akademis. Penulis bergabung dengan UKM Robotika ITS (tahun 2012-2013) sebagai staf Departemen HRD, dan HIMATEKTRO ITS (tahun 2013-2015) sebagai Sekretaris Himpunan. Penulis juga bergabung dengan tim asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik sejak tahun 2014 hingga saat ini. Penulis dapat dihubungi melalui email: nabila.ardhana@gmail.com.